



UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

Desarrollo de un entorno virtual para el aprendizaje y resolución de problemas comunes en plantas portátiles de tratamiento de agua por ósmosis inversa

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR(ES)

Alvarez Musayon, Daniel Jesus 0000-0002-9299-270X

Avila Aranda, Sebastian Jesus 0000-0002-5650-2945

ASESOR(ES)

Albatrino Aza, Renzo Francisco 0000-0002-0700-8182

Lima, 01 de diciembre de 2025

DEDICATORIA

“A Dios, quien me brindó la sabiduría para poder seguir creciendo y alcanzar esta meta.

A mis padres, por su amor incondicional, su motivación constante y su apoyo en cada aspecto de mi vida personal y profesional. Por último, a mí mismo, por no rendirme en el camino y siempre perseverar hasta el final.”

Daniel Álvarez

“A mi madre, por su confianza y amor incondicional que me ha brindado durante todo el transcurso de mi carrera profesional y quien me estuvo apoyando en todo momento para poder seguir adelante y nunca rendirme. A mi familia quienes me brindaron su apoyo en las diversas situaciones que se presentaron y me permitieron culminar este camino profesional”

Sebastian Avila

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestros padres, quienes han sido el pilar fundamental en nuestro camino académico y personal. Su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y la confianza que siempre depositaron en nosotros han sido esenciales para llegar hasta este momento. Gracias por enseñarnos a perseverar, a mantenernos firmes ante las dificultades y a trabajar con humildad y disciplina.

Asimismo, queremos reconocer el esfuerzo y dedicación que cada uno de nosotros ha puesto en la realización de este proyecto. Este trabajo es fruto de largas horas de aprendizaje, colaboración y compromiso. Hemos enfrentado diversos desafíos, pero gracias a la constancia, la comunicación y la motivación mutua, logramos culminar este proyecto de realidad virtual con éxito.

A todas las personas que nos brindaron su apoyo, orientación o palabras de ánimo durante este proceso, les extendemos nuestro agradecimiento y reconocimiento.

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de un entorno virtual en Unity, accesible a través de las gafas Meta Quest2, destinado a ser una herramienta adicional en la capacitación de una planta portátil de tratamiento de agua por ósmosis inversa. La solución está diseñada para capacitar a los trabajadores en la operación y resolución de problemas técnicos comunes, como fallos en la bomba de baja presión o en la membrana de ósmosis inversa. Además, ofrece una herramienta educativa para estudiantes de ingeniería y cualquier persona interesada en comprender el proceso de obtención de agua potable mediante el proceso de ósmosis inversa.

Durante el desarrollo del proyecto, se construyeron 6 escenarios, en los cuales el usuario puede aprender acerca de la operatividad de la planta, el mantenimiento y el uso adecuado del equipo de protección personal (EPP). Además, el sistema incluye una evaluación de 10 preguntas que permite medir los conocimientos adquiridos. Los escenarios son: “Información general de la planta”, “Simulación del recorrido del agua en la planta”, “Fuga de agua en tubería”, “Despiece de bomba”, “Prueba de resistencia al aislamiento” y “Detección de obstrucción en membranas de ósmosis inversa”.

El principal aporte de este proyecto es brindar un entorno interactivo que facilita a trabajadores y estudiantes la comprensión de los dispositivos y procesos involucrados en la obtención de agua potable por ósmosis inversa, así como la identificación de soluciones a problemas frecuentes, fortaleciendo su autonomía y capacidad de respuesta ante situaciones reales.

Palabras clave: Realidad virtual; Ósmosis inversa; Mantenimiento preventivo.

Development of a Virtual Environment for Learning and Solving Common Problems in Portable Reverse Osmosis Water Treatment Plants

ABSTRACT

This work presents the development of a virtual environment in Unity, accessible through Meta Quest 2 goggles, designed as an additional tool for training on a portable water treatment plant using reverse osmosis. The solution is intended to train workers in the operation and troubleshooting of common technical issues, such as failures in the low-pressure pump or the reverse osmosis membrane. Additionally, it serves as an educational tool for engineering students and anyone interested in understanding the process of obtaining potable water through reverse osmosis.

During the development of the project, six scenarios were created, allowing users to learn about the plant's operation, maintenance procedures, and the proper use of personal protective equipment (PPE). In addition, the system includes a 10 question assessment that allows measuring the knowledge acquired. The scenarios are: General information about the plant, Simulation of the water flow through the plant, Water leakage in a pipeline, Pump disassembly, Insulation resistance testing, and Detection of obstruction in reverse osmosis membranes.

The main contribution of this project is the creation of an interactive environment that helps workers and students understand the devices and processes involved in obtaining drinking water through reverse osmosis, as well as the identification of solutions to common problems, thereby strengthening their autonomy and ability to respond to real-world situations.

Keywords: Virtual reality; reverse osmosis; preventive maintenance.

INFORME DE ORIGINALIDAD

7%

INDICE DE SIMILITUD

7%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorioacademico.upc.edu.pe

Fuente de Internet

1%

2

docplayer.es

Fuente de Internet

1%

3

aprenderly.com

Fuente de Internet

1%

4

repositorio.utc.edu.ec

Fuente de Internet

<1%

5

repositorio.undac.edu.pe

Fuente de Internet

<1%

6

Submitted to Facultad de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala

Trabajo del estudiante

<1%

7

Soto Angles, Mario Eduardo. "Diseño de un Sistema de Detección y Diagnóstico de Fallas Basado en Modelo para una Planta Desalinizadora de Agua de Mar", Pontificia Universidad Católica del Perú (Peru), 2024

Publicación

<1%

8

hdl.handle.net

Fuente de Internet

<1%

9

www.ecopetrol.com.co

Fuente de Internet

<1%

10

Delgado Torres, Agustin M.. "Diseno preliminar de un sistema de desalacion por

<1%

osmosis inversa mediante energia solar termica", Universidad de La Laguna (Canary Islands, Spain), 2022

Publicación

11 www.cepis.org.pe <1 %
Fuente de Internet

12 baixardoc.com <1 %
Fuente de Internet

13 publik.tuwien.ac.at <1 %
Fuente de Internet

14 www.pereto.org <1 %
Fuente de Internet

15 [CONSULTEA S.A.C.. "Ampliación del EIA-D de la Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos y Relleno de Seguridad en las Lomas de Huatiana-IGA0005387", R.D. N° 2117-2018/DCEA/DIGESA/SA, 2020](#) <1 %
Publicación

16 creativecommons.org <1 %
Fuente de Internet

17 repositorio.unab.cl <1 %
Fuente de Internet

18 mdpi-res.com <1 %
Fuente de Internet

19 saber.ucv.ve <1 %
Fuente de Internet

20 core.ac.uk <1 %
Fuente de Internet

21 polodelconocimiento.com <1 %
Fuente de Internet

22

Fuente de Internet

<1%

23

repositorio.utn.edu.ec

Fuente de Internet

<1%

24

www.theben.de

Fuente de Internet

<1%

Excluir citas

Apagado

Exclude assignment
template

Activo

Excluir bibliografía

Activo

Excluir coincidencias

< 20 words

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO	10
1.1 ANTECEDENTES.....	10
1.2 DESCRIPCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN.....	11
1.3 ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	12
1.4 OBJETIVOS	13
1.4.1 General	13
1.4.2 Específicos	13
1.5 PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO	14
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	17
2.1 MARCO CONCEPTUAL	17
2.1.1 Bomba.....	17
2.1.2 Membrana de ósmosis inversa.....	17
2.1.3 Manómetro	18
2.1.4 Lámpara UV	19
2.1.5 Filtro suavizador.....	20
2.1.6 Filtro de sedimentos	21
2.1.7 Salmuera.....	22
2.1.8 Tablero de control	23
2.1.9 Plataforma de desarrollo Unity	24
2.1.10 Visor de realidad virtual Meta Quest	25
2.1.11 Equipos de Protección Personal.....	26
2.2 ESTÁNDARES, FRAMEWORKS Y BUENAS PRÁCTICAS.....	28
2.2.1 Estándares	28
2.2.2 Frameworks	28
2.3 BASES LEGALES Y MARCO NORMATIVO	29
2.3.1 Bases Legales.....	29
2.3.2 Marco Normativo	29
CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO.....	32
3.1 DISEÑO/DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	32
3.1.1 Modelado 3D de la planta	34

3.1.2	Configuración del entorno virtual	36
3.1.3	Escenas desarrolladas en el entorno virtual.....	37
3.2	RESULTADOS OBTENIDOS	63
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
4.1	CONCLUSIONES	70
4.2	RECOMENDACIONES	72
	REFERENCIAS	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Característica de los suavizadores	41
Tabla 2 Voltajes que deben aplicarse durante la prueba de aislamiento	60
Tabla 3 <i>Valores mínimos de resistencia de aislamiento a 40°C en MΩ</i>	60
Tabla 4 <i>Valores mínimos del índice de polarización</i>	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Planta utilizada para el modelado 3D.....	11
Figura 2 <i>Árbol de problemas</i>	13
Figura 3 <i>Cronograma del proyecto</i>	16
Figura 4 <i>Bomba</i>	17
Figura 5 Elementos típicos de una membrana de O.I.....	18
Figura 6 Manómetro utilizado en la planta de referencia.....	19
Figura 7 <i>Escala de radiación UV</i>	20
Figura 8 Purificador de agua con luz ultravioleta.....	20
Figura 9 Filtro suavizador utilizado en la planta de referencia	21
Figura 10 Filtro de sedimentos utilizado en la planta de referencia.....	22
Figura 11 Tanque de salmuera con Filtro suavizador.....	23
Figura 12 Tablero de control utilizado en la planta de referencia.....	24
Figura 13 <i>Planta Química en Unity 3D</i>	25
Figura 14 <i>Lentes de realidad virtual</i>	26
Figura 15 <i>Equipos de Protección Personal</i>	27
Figura 16 <i>Sistema de desinfección</i>	27
Figura 17 <i>Arquitectura del funcionamiento de Unity con los Meta Quest</i>	33
Figura 18 <i>Esquema general del desarrollo del proyecto</i>	34
Figura 19 <i>Modelado de la planta de tratamiento de agua por ósmosis inversa</i>	34
Figura 20 <i>Importado del modelado en Unity sin color ni textura</i>	35
Figura 21 <i>Selección de color y texturizado para el modelado en Substance Painter 3D</i> ...	35
Figura 22 <i>Modelado con la importación de color y textura del Substance Painter 3D</i>	36
Figura 23 Diagrama de flujo del escenario principal	39
Figura 24 <i>Membrana N°1</i>	42
Figura 25 <i>Membrana N°2</i>	43
Figura 26 <i>Primer conector de 3 uniones</i>	44
Figura 27 <i>Membrana N°3</i>	45
Figura 28 <i>Segundo conector de 3 uniones</i>	46
Figura 29 Sistema de membranas presentes en el entorno virtual.....	47
Figura 30 Diagrama de flujo del escenario “Recorrido del agua”.....	51
Figura 31 Configuración para simular el goteo de agua.....	52
Figura 32 Diagrama de flujo del escenario “Fuga de agua en tubería”.....	54

Figura 33 Configuración del script de jerarquía entre las herramientas y sus piezas dependientes	56
Figura 34 Configuración del script condicional para el desensamble de la bomba	56
Figura 35 Configuración del script de jerarquía entre el destornillador y sus tornillos	59
Figura 36 Configuración del script condicional para el desensamble de la caja de conexiones	59
Figura 37 Diagrama de flujo para la medida de la resistencia de aislamiento	61
Figura 38 Diagrama de flujo del escenario “Detección de obstrucción en membranas”	63
Figura 39 <i>Primeros resultados obtenidos en la escena “Información general de la planta”</i>	64
Figura 40 <i>Últimos resultados obtenidos en la escena “Información general de la planta”</i>	65
Figura 41 <i>Resultados obtenidos en la escena “Simulación del recorrido del agua en la planta”</i>	66
Figura 42 <i>Resultados obtenidos en la escena “Fuga de agua en tubería”</i>	67
Figura 43 <i>Resultados obtenidos en la escena “Despiece de bomba”</i>	68
Figura 44 <i>Resultados obtenidos en la escena “Prueba de resistencia al aislamiento”</i>	69
Figura 45 <i>Resultados obtenidos en la escena “Detección de obstrucción en membranas de ósmosis inversa”</i>	70

CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

1.1 Antecedentes

La falta de acceso inmediato a especialistas de mantenimiento en plantas de tratamiento de agua portátiles puede conducir a retrasos significativos en la identificación y resolución de problemas técnicos, lo que resulta en interrupciones costosas en la producción de agua. En este sentido, Liu et al. (2022) señalan que la insuficiente capacitación del personal de mantenimiento incrementa la probabilidad de fallas no previstas, generando consecuencias operativas y económicas que afectan directamente la continuidad del servicio. Con esta observación, se evidencia que no abordar los problemas acarrea consecuencias negativas para la producción y la economía de la planta.

Riofrio-Morales y García (2021) realizaron un sistema de realidad virtual que consta de tres módulos: el primero es introductorio a motores de inducción, otro de diagnóstico donde la persona analiza fallas visualizando señales en un osciloscopio, y un tercero para evaluar el aprendizaje en RV. Lo rescatable de este proyecto es la evaluación que tendrá el usuario para medir su aprendizaje dentro del entorno virtual, así como la interacción con las herramientas para la identificación de fallas.

Checa et al. (2021) utilizaron realidad virtual y el motor de video juegos Unreal Engine 4 para crear un entorno virtual, para que el usuario pueda aprender sobre motores. Para ello, se crean niveles, en el primer nivel, se le enseña al usuario a manipular las interfaces de realidad virtual para luego, realizar el ensamble de un motor con un generador de corriente y su respectivo acople para que el sistema funcione correctamente. Lo considerado en este proyecto es la diversidad de escenas que contiene el entorno virtual. Asimismo, se resalta la definición de los elementos a interactuar y el uso de fórmulas para ampliar el conocimiento técnico del usuario.

Hamidane et al. (2018) llevaron a cabo un proyecto de mantenimiento preventivo utilizando realidad aumentada en una planta de cemento ubicada en Argelia. El objetivo principal de este proyecto fue proporcionar asistencia virtual a los operarios de la planta durante las actividades de mantenimiento, con la finalidad de reducir costos y mejorar la eficiencia operativa. Este proyecto permitió el monitoreo en tiempo real y la anticipación de posibles fallos en los equipos. Lo considerado en este proyecto es la secuencia de pasos brindada por la interfaz virtual al usuario, ya que con esto tiene instrucciones específicas para poder realizar las tareas.

Considerando la escasez de proyectos disponibles y las restricciones mencionadas en los proyectos anteriores, este artículo propone el diseño de un entorno virtual para el aprendizaje y resolución de problemas comunes en plantas portátiles de tratamiento de agua por ósmosis inversa. Con esto, se estima que el entorno virtual puede servir como herramienta para ayudar en la capacitación de este tipo de plantas. Algo importante a mencionar, es que el modelado 3D utilizado en este proyecto se basa en una pequeña planta portátil de ósmosis inversa ubicado en Piura, Perú. El modelo físico se puede observar en la Figura 1.

Figura 1

Planta utilizada para el modelado 3D



1.2 Descripción de la Organización

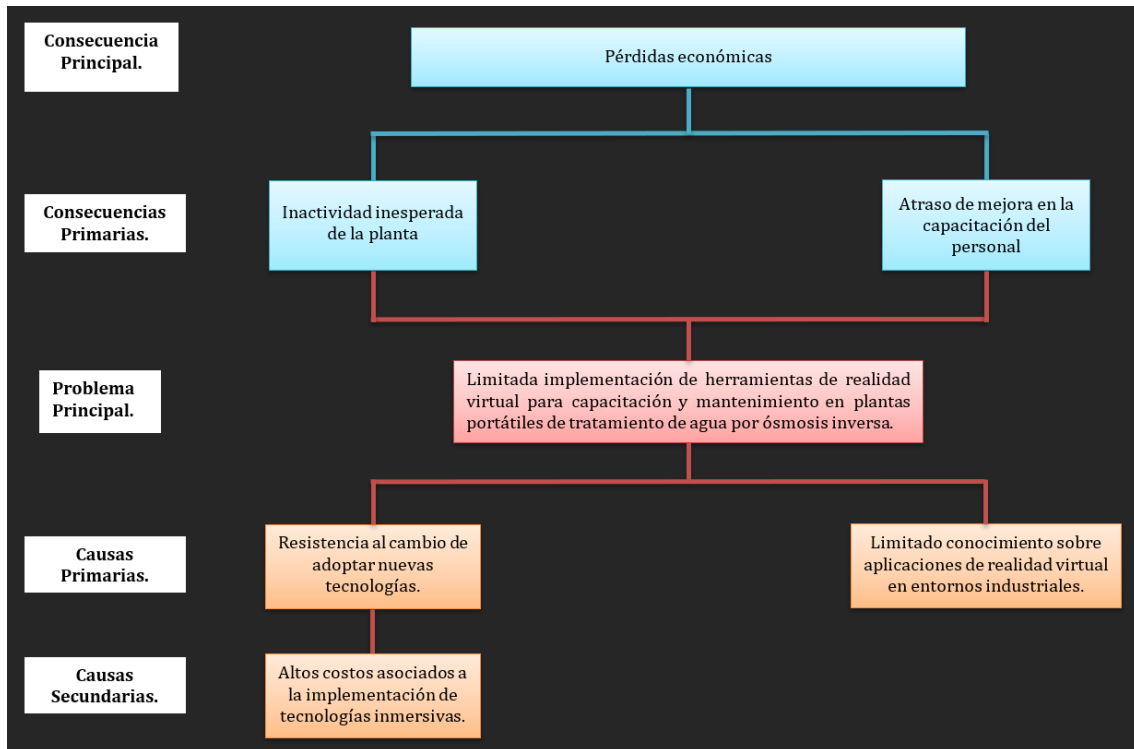
Este proyecto puede ser utilizado en empresas que realicen tratamiento de agua por ósmosis inversa. Además, puede ser utilizado en colegios, universidades, entidades públicas y privadas. Debido que el objetivo del proyecto es que las personas conozcan cómo se realiza el tratamiento del agua, además, por el modelado 3D realizado y la información brindada se puede aprender sobre los dispositivos de la planta.

1.3 Análisis del Problema

El acceso al agua potable es un desafío que persiste y afecta a millones de personas en todo el mundo, principalmente en lugares con recursos limitados. En respuesta a esta necesidad, las plantas portátiles de tratamiento de agua por ósmosis inversa han resultado una solución efectiva para garantizar un suministro de agua de calidad (Riofrio-Morales & Garcia, 2021). Estas plantas ofrecen una alternativa práctica y escalable para mitigar la escasez de agua. Sin embargo, su operatividad efectiva depende en gran medida de un mantenimiento adecuado. La falta de atención en este aspecto puede provocar fallos operativos críticos, como la reducción de presión en las bombas y el deterioro de las membranas de ósmosis inversa, comprometiendo tanto la calidad del agua producida como la continuidad del servicio, lo que a su vez genera tiempos de inactividad prolongados y pérdidas significativas en la producción (Checa et al., 2021; Hamidane et al., 2018). No obstante, los métodos tradicionales de capacitación enfrentan varios desafíos, como altos costos, riesgos inherentes a la práctica en entornos reales y la escasez tanto de técnicos calificados como de equipos disponibles. Ante esto, la implementación de un sistema virtual resulta una buena opción, debido que permite a los trabajadores practicar y aprender procedimientos en un entorno virtual interactivo (Checa et al., 2022; Han, 2023). Este proyecto presenta el desarrollo de un entorno virtual interactivo para capacitar a los trabajadores en el manejo y mantenimiento de una planta portátil de tratamiento de agua por ósmosis inversa. A través de este entorno virtual, los usuarios pueden aprender los procesos necesarios para obtener agua potable y abordar problemas comunes, como fallos en la bomba de baja presión y en la membrana de ósmosis inversa. Además, el entorno proporciona las herramientas necesarias para realizar mantenimientos preventivos, lo que permite reducir la dependencia de técnicos externos, minimizando así los tiempos de inactividad y las pérdidas de producción. En la Figura 2 se puede observar el árbol del problema, donde se especifican las causas y consecuencias del problema principal.

Figura 2

Árbol de problemas



1.4 Objetivos

1.4.1 General

Desarrollar un entorno virtual para el aprendizaje y resolución de problemas comunes en plantas de tratamiento de agua por ósmosis inversa.

1.4.2 Específicos

1. Modelar en 3D la planta.
2. Desarrollar la escena de Información general de planta.
3. Desarrollar la escena de Simulación del recorrido del agua en la planta.
4. Desarrollar la escena de Fuga de agua en tubería.
5. Desarrollar la escena de Despiece de bomba.
6. Desarrollar la escena de Prueba de resistencia al aislamiento.
7. Desarrollar la escena de Detección de obstrucción en membranas de ósmosis inversa.
8. Desarrollar test de evaluación.
9. Integrar información sobre los EPP's.

1.5 Planificación del Proyecto

Como se puede observar en la Figura 3, el proyecto se implementó en aproximadamente 16 semanas y posee los siguientes objetivos:

1. Modelado 3D de la planta

Es necesario que el usuario tenga noción de cómo es una planta de tratamiento de agua por ósmosis inversa. Por ello, se debe realizar el modelado 3D de la planta.

2. Desarrollar la escena de Información general de planta

El objetivo de esta escena es que el usuario visualice, en el entorno virtual, los dispositivos que hay en las plantas de tratamiento de agua por ósmosis inversa. También, se requiere que aprenda a cómo interactuar con el entorno virtual y que aprenda más sobre los dispositivos de la planta.

3. Desarrollar la escena de Simulación del recorrido del agua en la planta.

En esta escena, la persona podrá identificar la secuencia que realiza el agua por los dispositivos. Además, el usuario podrá prever el flujo de permeado producido por las membranas y estimar cada cuánto tiempo se debe realizar el cambio de salmuera.

4. Desarrollar la escena de Fuga de agua en tubería.

En esta escena, el usuario podrá observar la simulación de una fuga de agua presente en una tubería. También se le brindarán indicaciones de cómo poder controlar esta fuga.

5. Desarrollar la escena de Despiece de bomba

Este escenario tiene como objetivo mostrarle al usuario como podría realizar un despiece de una bomba. Además, mediante un vídeo el usuario tendrá noción de cómo poder realizar el ensamble de la bomba.

6. Desarrollar la escena de Prueba de resistencia al aislamiento.

En esta escena, se requiere que el sistema le brinde al usuario qué pasos seguir para realizar la prueba de resistencia al aislamiento al motor.

7. Desarrollar la escena de Detección de obstrucción en membranas de ósmosis inversa

Esta escena le muestra al usuario cuando una membrana de ósmosis inversa puede estar obstruida. Además, podrá tener noción de cómo extraer estas membranas por medio de un vídeo.

8. Desarrollar test de evaluación.

Con este objetivo, se quiere incorporar una evaluación que determine el nivel de aprendizaje obtenido por el usuario. Esta prueba, estaría incorporado en el escenario principal y tendría un tiempo límite para desarrollar.

9. Integrar información sobre los equipos de protección personal (EPP) a utilizar.

Se requiere brindarle información al usuario sobre los posibles EPP a utilizar.

Figura 3

Cronograma del proyecto

CRONOGRAMA DEL PROYECTO																
Actividad	Semanas															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. Modelar en 3D la planta	■	■	■	■												
2. Desarrollar la escena de Información general de planta								■	■	■	■	■	■	■	■	
3. Desarrollar la escena de Simulación del recorrido del agua en la planta				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
4. Desarrollar la escena de Fuga de agua en tubería						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
5. Desarrollar la escena de Despiece de bomba				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
6. Desarrollar la escena de Prueba de resistencia al aislamiento									■	■	■	■	■	■	■	
7. Desarrollar la escena de Detección de obstrucción en membranas de ósmosis inversa				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
8. Incorporar test de evaluación														■	■	■
9. Información sobre los equipos de protección personal (epp) a utilizar.														■	■	■

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Conceptual

En este capítulo, se abordarán los fundamentos teóricos esenciales para el entendimiento y desarrollo del presente trabajo.

2.1.1 Bomba

Una bomba es un dispositivo mecánico, como se muestra en la Figura 4, diseñado que sirve para mover un fluido desde un nivel de presión o altura menor hacia uno mayor, generando la fuerza necesaria para vencer pérdidas por fricción, variaciones de elevación, accesorios en tuberías y otras resistencias del sistema.

En sistemas de tratamiento de agua, las bombas intervienen en múltiples etapas: captación, alimentación a procesos, dosificación química, recirculación, retrolavado y distribución. Su operación debe mantenerse dentro del punto de máxima eficiencia para evitar cavitación, desgaste prematuro o consumo energético excesivo (Filipe et al., 2019).

Figura 4

Bomba



Nota. De "BOPEMA 2021", por BOPEMA, 2021. (<https://irp.cdn-website.com/f5e1a6ce/files/uploaded/BOPEMA%202021.pdf>).

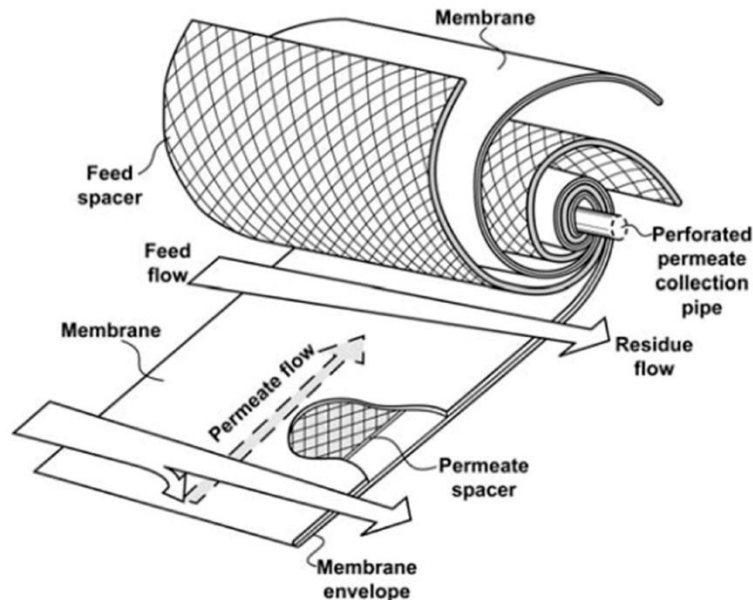
2.1.2 Membrana de ósmosis inversa

Estos son filtros semipermeables, como se muestra en la Figura 5, diseñados para reducir las impurezas del agua. Para ello, se debe ingresar agua a alta presión dando como resultado dos tipos de aguas: una es una agua purificada o permeada y otra es un agua que no ha podido ser (Moreno Rosario, 2017).

Según Wei et al. (2021), “el módulo de membrana enrollada en espiral (SWM) es la configuración más utilizada en los sistemas de ósmosis inversa debido a su alta densidad de empaquetamiento y su costo relativamente bajo” (p. 2).

Figura 5

Elementos típicos de una membrana de O.I



Nota. De "Multicomponent Spiral Wound Membrane Separation Model for CO₂ Removal from Natural Gas", por Abdul Latif, A.A., Lau, K.K., Low, S.C. & Azeem, B., 2021. (<https://www.mdpi.com/2077-0375/11/9/654>).

2.1.3 Manómetro

Un manómetro, como se muestra en la Figura 6, es un instrumento destinado a medir la presión de un fluido o la diferencia de presión entre dos puntos de un sistema cerrado. Su principio de funcionamiento se basa en el equilibrio hidrostático: la diferencia de alturas en una columna de líquido manométrico (generalmente agua, aceite o mercurio) representa la presión ejercida por el fluido (Sugarman, 2023).

En las plantas de tratamiento de agua, los manómetros desempeñan un papel fundamental en la supervisión de la presión dentro de las líneas hidráulicas, bombas, válvulas y filtros. Su uso garantiza que las condiciones operativas se mantengan dentro de rangos seguros, evitando fallos o daños en los equipos. Además, los manómetros ayudan a detectar pérdidas de carga en los filtros, evaluar el rendimiento de las bombas y proteger los componentes más delicados del proceso.

Figura 6

Manómetro utilizado en la planta de referencia



2.1.4 Lámpara UV

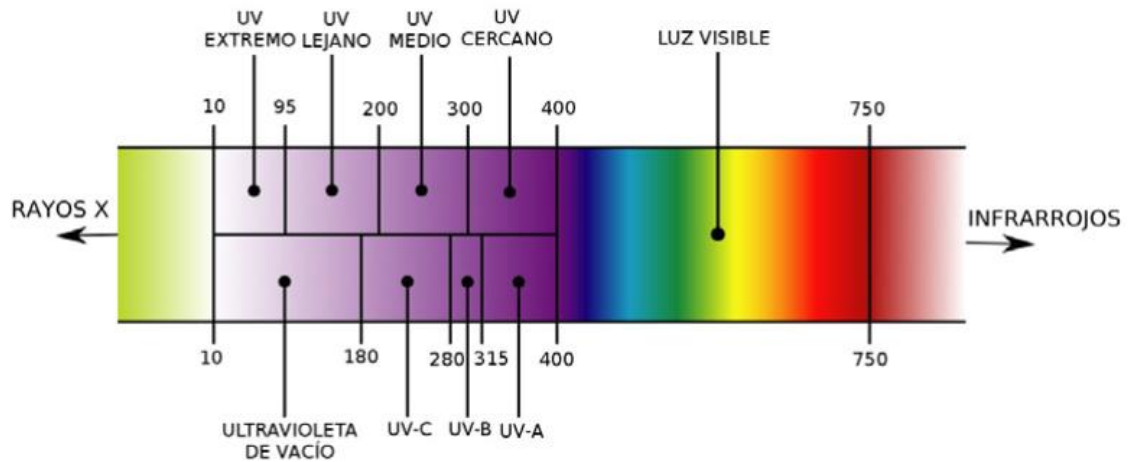
La desinfección por radiación ultravioleta (UV) es un proceso físico empleado en el tratamiento de agua que utiliza luz ultravioleta, como se muestra en la Figura 7, particularmente en la longitud de onda germicida cercana a 254 nanómetros, para inactivar microorganismos patógenos como bacterias, virus, protozoos y esporas. Este método actúa dañando el material genético (ADN o ARN) de los microorganismos, impidiendo su replicación y capacidad de infección (Antolín Gutiérrez, 2014).

A diferencia de los desinfectantes químicos, la desinfección UV no introduce compuestos al agua, no altera su sabor ni olor, y no deja residuos, lo que la convierte en una alternativa más segura y ambientalmente sostenible. (Adeniyi & Jimoh, 2024)

Sin embargo, su eficacia depende de la claridad del agua (baja turbidez) ya que las partículas suspendidas pueden bloquear el paso de la radiación. Por este motivo, el tratamiento UV suele aplicarse después de procesos de filtración física o sedimentación (Soleimanpour Makuei et al., 2022). Ver Figura 8.

Figura 7

Escala de radiación UV



Nota. De "Instalación de un equipo de desinfección de agua de riego en zona de riesgo", por María Eugenia Gutiérrez Vielva, 2014. (<https://uvadoc.uva.es/handle/10324/6584>).

Figura 8

Purificador de agua con luz ultravioleta



Nota. De "Sistema Purificador de agua con luz ultravioleta: filtro", por Boris Tito, 2021. (<https://ingenieriaambiental.net/purificador-de-agua-con-luz-ultravioleta/>).

2.1.5 Filtro suavizador

Un filtro suavizador de agua o ablandador de agua, como se muestra en la Figura 9, opera mediante el proceso de intercambio iónico. En este proceso los iones que causan la dureza del agua (principalmente Ca^{2+} y Mg^{2+}) son reemplazados por iones de sodio u otros iones monovalentes en una resina catiónica. (Culligan, 2023).

La eficiencia del proceso está determinada por varios factores como la capacidad de la resina, su afinidad con los iones que causan la dureza del agua, las condiciones de

operación y el diseño del sistema de regeneración. En este sentido, un filtro suavizador no se limita a retener partículas como lo haría un filtro físico, sino que realiza una transformación química al intercambiar los iones presentes en el agua, reduciendo así su dureza.

Figura 9

Filtro suavizador utilizado en la planta de referencia



2.1.6 Filtro de sedimentos

Un filtro de sedimentos, como se muestra en la Figura 10, es un dispositivo de filtración mecánica cuyo propósito es retener y eliminar partículas sólidas suspendidas en el agua, tales como arena, polvo, óxido, fragmentos de materia orgánica u otros sedimentos transportados por el flujo del agua.

Su función principal es actuar como barrera inicial para mejorar la claridad del agua, proteger los equipos del sistema de tratamiento (tuberías, membranas, bombas, etc.) de obstrucciones o desgaste, y reducir la turbidez del agua. Sin embargo, estos filtros no eliminan contaminantes disueltos como químicos, metales pesados, ni mejoran el sabor u olor del agua.

Figura 10

Filtro de sedimentos utilizado en la planta de referencia



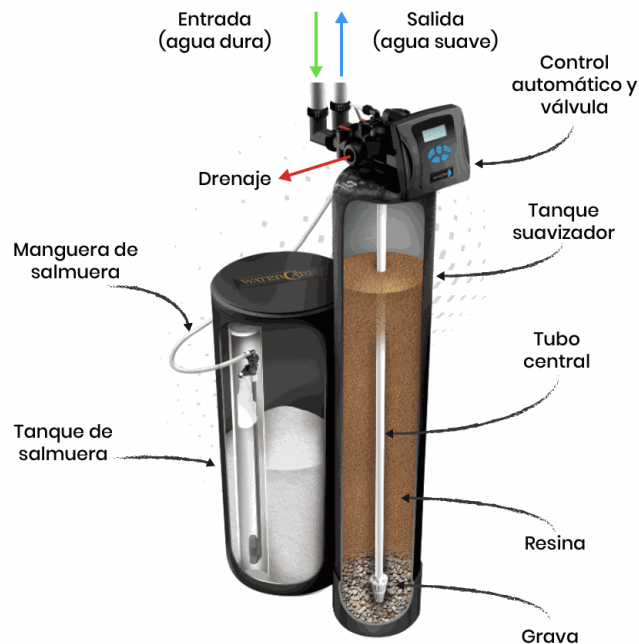
2.1.7 Salmuera

La salmuera es el subproducto líquido que se genera después de extraer las sales del agua de alimentación, como se muestra en la Figura 11, ya sea mediante ósmosis inversa, procesos térmicos u otras tecnologías de desalinización. Este efluente contiene una alta concentración de sales disueltas en comparación con el agua original, además de posibles residuos químicos provenientes del pretratamiento o de la limpieza de las membranas.

Debido a su alta salinidad y densidad, la salmuera no puede ser descargada directamente sin un manejo o tratamiento adecuado, ya que su vertido puede provocar impactos ambientales significativos, especialmente en ecosistemas marinos o acuíferos receptores.

Figura 11

Tanque de salmuera con Filtro suavizador



Nota. De "¿Qué es un suavizador de agua?", por Firessa, s. f. (<https://firessa.com/blog/filtracion/suavizadores/que-es/>)

2.1.8 Tablero de control

Un tablero de control o panel de control es un dispositivo o un conjunto de dispositivos eléctricos/electrónicos que permite supervisar, ejecutar y automatizar el funcionamiento de diversos equipos y procesos dentro de una instalación. Normalmente incorpora elementos tales como controladores programables (PLC), interfaces hombre-máquina (HMI), relés, contactores, fusibles, interruptores, sensores, alarmas y circuitos de protección, dispuestos dentro de un gabinete o consola. El tablero de control actúa como centro neurálgico de operación y coordinación del sistema. (RTeng, 2023)

En plantas de tratamiento de agua, los tableros de control, como se muestra en la Figura 12, facilitan la gestión automática y supervisión del proceso, controlando bombas, válvulas dosificadoras, sensores de nivel, presión, caudal, calidad de agua, alarmas y otros instrumentos clave.

Figura 12

Tablero de control utilizado en la planta de referencia



2.1.9 Plataforma de desarrollo Unity

Un entorno virtual generado con Unity es un espacio tridimensional simulado por computadora, interactivo y visualmente inmersivo, en el cual el usuario puede moverse, interactuar y percibir estímulos visuales, auditivos u otros efectos sensoriales. En este sentido, Unity funciona como un motor de desarrollo (game engine) que facilita la construcción, renderizado, lógica e interacción de ese mundo virtual (Sarumathi et al., 2023).

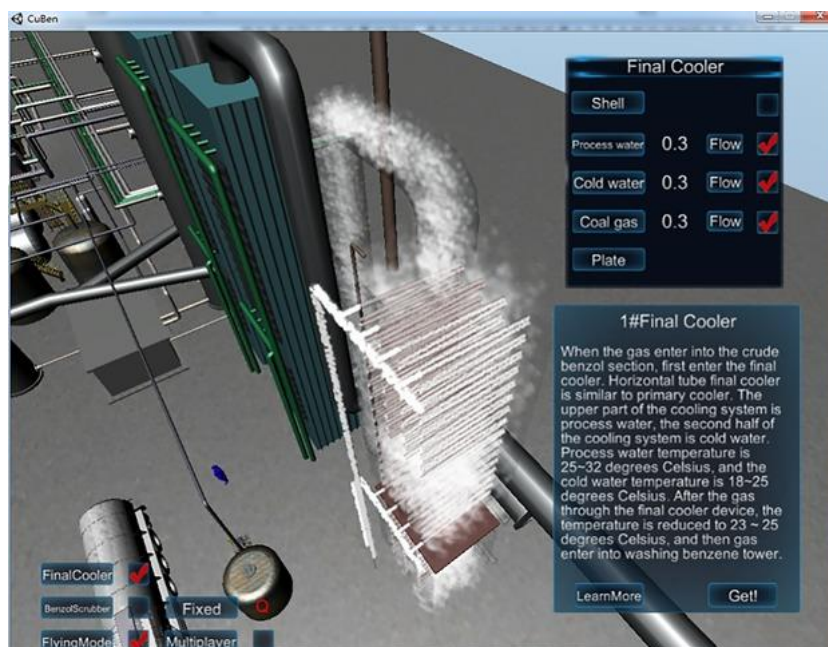
Los entornos desarrollados en Unity se aplican en ámbitos como la educación, ingeniería y simulación, permitiendo representar sistemas físicos como plantas de tratamiento de agua para su comprensión, control o capacitación operativa sin riesgo real.

En el campo de la investigación experimental, Brookes et al. (2019) muestran que Unity, mediante el marco UXF, permite crear entornos 3D para el estudio del comportamiento utilizando cascos de realidad virtual, lo que facilita la manipulación de variables y la recopilación de datos. Asimismo, Mirauda et al. (2020) desarrollaron un laboratorio virtual con Unity 3D para capacitar personal en la medición de flujos en canales abiertos,

mientras que Ouyang et al. (2017) recrearon secciones reales de una planta química en un entorno Unity 3D con fines formativos como se observa en la Figura 13.

Figura 13

Planta Química en Unity 3D



Nota. De "A Unity3D-based interactive three-dimensional virtual practice platform for chemical engineering", por Ouyang, S.-G., Wang, G., Yao, J.-Y., Zhu, G.-H.-W., Liu, Z.-Y. & Feng, C., 2018. (<https://doi.org/10.1002/cae.21863>).

2.1.10 Visor de realidad virtual Meta Quest

Los Meta Quest, como se muestra en la Figura 14, se distinguen por ser visores de realidad virtual completamente autónomos. Esto significa que no necesitan estar conectados a un computador ni dependen de cables para funcionar, ya que integran en un solo dispositivo el procesador, los sensores, las pantallas, el sistema de audio y el sistema operativo. En consecuencia, proporcionan una experiencia de inmersión completa con seis grados de libertad (6 DoF), seguimiento inside-out y capacidades de realidad mixta (passthrough) que combinan elementos virtuales con el entorno físico (Meta Platforms, 2024).

Los Meta Quest se han empleado en múltiples contextos de investigación, educación y simulación. Por ejemplo, el simulador RetinaVR, basado en Meta Quest 2 ha demostrado ser eficaz para el entrenamiento en cirugía vitreorretinal (Antaki et al, 2024). En estudios de realidad mixta, se ha evaluado la capacidad del Quest 3 para combinar visualización del entorno real con modelos digitales, optimizando tareas de interacción espacial.

Figura 14

Lentes de realidad virtual



2.1.11 Equipos de Protección Personal

Los Equipos de Protección Personal (EPP), como se muestra en la Figura 15, son dispositivos destinados a reducir la exposición del trabajador a riesgos físicos, químicos, biológicos o mecánicos presentes en el entorno laboral. Diversas investigaciones han demostrado que el uso adecuado de EPP constituye una de las estrategias más efectivas para prevenir lesiones y accidentes ocupacionales. Asimismo, estudios aplicados a sectores industriales han evidenciado que factores como el conocimiento, la actitud y la cultura de seguridad influyen directamente en la adherencia al uso del EPP (Khoshakhlagh et al., 2024). De manera similar, revisiones recientes señalan que la disponibilidad y el acceso a EPP de calidad reducen la incidencia de accidentes en diversos entornos productivos (Ayu et al., 2025). En conjunto, la literatura respalda que la correcta implementación de EPP, acompañada de políticas de seguridad y capacitación continua, es fundamental en la gestión de la salud ocupacional.

Figura 15

Equipos de Protección Personal



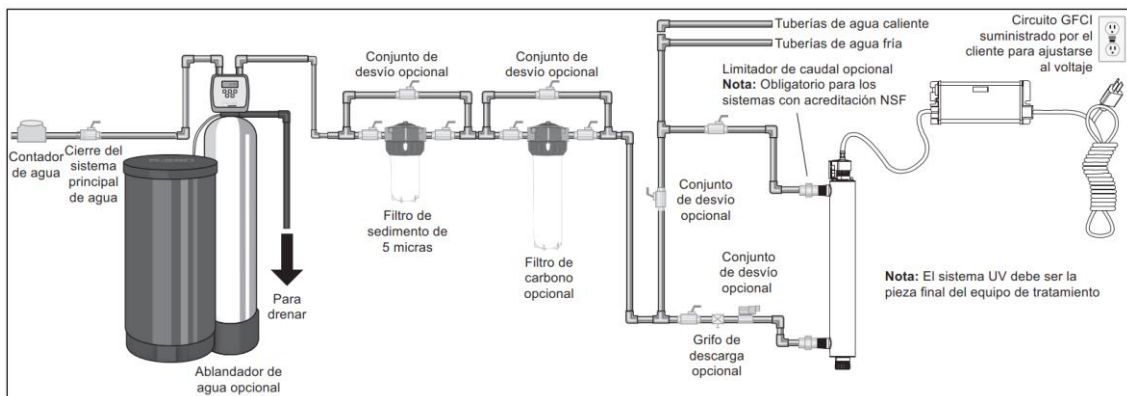
Nota. De "Equipos de protección personal (EPP)", por Marco Taller, s.f. (<https://www.marcotaller.com/equipos-de-proteccion-personal-epp/>)

En la Figura 16 se muestra la instalación de un sistema de desinfección típico y sus componentes relacionados que se pueden usar para la instalación.

Sistema de desinfección

Figura 16

Sistema de desinfección



Nota. De "Serie-SQ", por Carbotecnia, s. f. (<https://carbotecnia.info/PDF/uv/Serie-SQ.pdf>)

2.2 Estándares, frameworks y buenas prácticas

2.2.1 Estándares

2.2.1.1 NSF/ANSI 42

Especifica los requisitos para sistemas de filtración de efectos estéticos, enfocados en la reducción de cloro, olor, sabor y partículas en el agua potable.

2.2.1.2 NSF/ANSI 53

Establece los criterios de desempeño para sistemas de filtración orientados a la reducción de contaminantes que afectan la salud, como metales pesados, quistes y compuestos orgánicos volátiles.

2.2.1.3 NSF/ANSI 55

Establece los requisitos de diseño y desempeño para sistemas de tratamiento de agua mediante radiación ultravioleta (UV), asegurando su eficacia en la desinfección microbiológica.

2.2.1.4 NSF/ANSI 58

Define los requisitos de rendimiento, materiales y seguridad para sistemas de ósmosis inversa (RO) destinados a producir agua potable, incluyendo pruebas de eficiencia y reducción de contaminantes disueltos.

2.2.1.5 NSF/ANSI 61

Regula la seguridad de los materiales y componentes que están en contacto con el agua potable, verificando que no liberen sustancias químicas nocivas.

2.2.2 Frameworks

2.2.2.1 WSP (Plan de Seguridad del Agua)

El Plan de Seguridad del Agua (WSP) es un enfoque preventivo de gestión integral del riesgo aplicado a los sistemas de abastecimiento de agua potable, desde la fuente hasta el consumidor.

Desarrollado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), el WSP busca garantizar la inocuidad del agua mediante la identificación, evaluación y control de peligros que puedan afectar la calidad del agua en cualquiera de las etapas del proceso.

2.2.2.2 HACCP (Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control)

El HACCP es un sistema preventivo de control de la inocuidad originalmente desarrollado para la industria alimentaria, pero ampliamente aplicado al tratamiento y distribución de agua potable.

Se basa en el análisis sistemático de peligros y la identificación de puntos críticos de control (PCC) donde se pueden aplicar medidas para prevenir, eliminar o reducir peligros a niveles seguros.

2.2.2.3 PDCA (Plan–Do–Check–Act)

También conocido como Ciclo de Deming o Ciclo de Mejora Continua, es un modelo de gestión y control de calidad utilizado en sistemas de gestión ambiental, de calidad, de activos y de riesgos (como ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001, ISO 55001, e ISO 31000). Es un framework (marco de mejora continua) que asegura que la planta de tratamiento opere bajo un enfoque sistemático de planificación, control y optimización constante.

2.3 Bases Legales y Marco Normativo

2.3.1 Bases Legales

2.3.1.1 Ley N.º 26842 – Ley General de Salud

Regula que toda agua destinada al consumo humano debe ser segura y cumplir con los requisitos sanitarios de potabilidad, bajo supervisión del Ministerio de Salud.

2.3.1.2 Ley N.º 29338 – Ley de Recursos Hídricos

Declara el agua como patrimonio de la nación y establece que toda captación, tratamiento o vertimiento de agua debe estar autorizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), priorizando su uso para consumo humano.

2.3.2 Marco Normativo

2.3.2.1 D.S. N.º 031-2010-SA – Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano

Establece los parámetros de calidad y requisitos sanitarios que debe cumplir el agua destinada al consumo humano, asegurando su inocuidad y potabilidad. Es la norma base para evaluar la calidad del agua tratada por plantas fijas o portátiles.

2.3.2.2 D.S. N.º 007-98-SA – Reglamento sobre Vigilancia y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano

Regula las acciones de vigilancia, control y fiscalización sanitaria del agua potable por parte del MINSA y las entidades prestadoras, garantizando el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos en la normativa nacional.

2.3.2.3 R.M. N.º 195-2015/MINSA – Guía para la Implementación del Plan de Seguridad del Agua (PSA)

Aprueba los Lineamientos para la Elaboración del Plan de Seguridad del Agua (WSP), estableciendo procedimientos para identificar y controlar riesgos que puedan afectar la inocuidad del agua potable, aplicable a sistemas fijos y plantas portátiles.

2.3.2.4 R.M. N.º 146-2021/MINAM – Límites Máximos Permisibles (LMP)

Aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, definiendo los límites máximos de contaminantes en fuentes y vertimientos, y orientando la protección de la salud y del medio ambiente en la operación de sistemas de tratamiento de agua.

2.3.2.5 ISO 31000:2018 – Gestión del Riesgo

Proporciona principios, marco y directrices para gestionar los riesgos de manera sistemática y efectiva, aplicable a cualquier organización o sistema, incluyendo plantas de tratamiento de agua.

2.3.2.6 ISO 24512:2007 – Gestión de Sistemas de Agua Potable

Establece directrices para la operación, mantenimiento, monitoreo y mejora de los servicios de agua potable, asegurando la inocuidad, confiabilidad y eficiencia en toda la cadena de suministro.

2.3.2.7 ISO 24516-1:2016 – Gestión de Sistemas de Agua Potable

Define procedimientos y prácticas para la gestión de activos e infraestructura en sistemas de agua potable, optimizando el ciclo de vida de los equipos y reduciendo riesgos operativos.

2.3.2.8 ISO 9001:2015 – Sistemas de Gestión de Calidad

Establece los requisitos para un sistema de gestión de calidad basado en la mejora continua, asegurando que los procesos y servicios cumplan con los requisitos del cliente y la normativa aplicable.

2.3.2.9 ISO 14001:2015 – Sistemas de Gestión Ambiental

Proporciona un marco para gestionar los aspectos ambientales de una organización, incluyendo la prevención de la contaminación, el cumplimiento legal y la mejora del desempeño ambiental en procesos como el tratamiento de agua.

2.3.2.10 ISO 45001:2015 – Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo

Define los requisitos para gestionar riesgos laborales y proteger la seguridad y salud de los trabajadores, aplicable al personal que opera y mantiene plantas de tratamiento de agua.

2.3.2.11 NFPA 70

Establece los requisitos de seguridad para el diseño, instalación y mantenimiento de sistemas eléctricos en edificaciones e instalaciones industriales. Garantiza la protección de las personas y equipos contra riesgos eléctricos, siendo aplicable a las instalaciones eléctricas de plantas de tratamiento de agua portátiles.

CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO

En el presente capítulo se brindarán los detalles correspondientes para elaborar el entorno virtual.

3.1 Diseño/Desarrollo de la Solución

Para el desarrollo del entorno virtual se utilizó el motor de videojuegos Unity, reconocido por su versatilidad en la creación de simulaciones realistas. Unity proporciona una amplia variedad de herramientas que facilitan la creación de experiencias interactivas, optimizando tanto el rendimiento como la interacción del usuario, lo que resulta ideal para entornos de simulación complejos. Las interacciones dentro de la plataforma se programaron utilizando el lenguaje C#.

Además, para realizar el modelado 3D de la planta de ósmosis inversa se empleó el software de Autodesk Inventor Professional 2022 que permitió generar componentes con alto nivel de detalle y precisión. También, se empleó el software Meta Quest Link para establecer la conexión entre los lentes de realidad virtual y la computadora durante el proceso de desarrollo y pruebas. Ver Figura 17.

La interacción del usuario con el entorno digital se realiza mediante el visor de realidad virtual Meta Quest 2, el cual posee un seguimiento de seis grados de libertad (6DoF), lo que significa que los usuarios pueden moverse y girar en el espacio tridimensional de manera natural. Además, los controladores táctiles son ergonómicos y precisos, proporcionando una interacción fluida con los entornos virtuales.

Figura 17

Arquitectura del funcionamiento de Unity con los Meta Quest



Nota. Adaptado de “Diseño de un sistema de realidad virtual escalable para simular la utilización de un torno híbrido industrial”, por J. A. Robayo Murillo, 2023 (<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83814>).

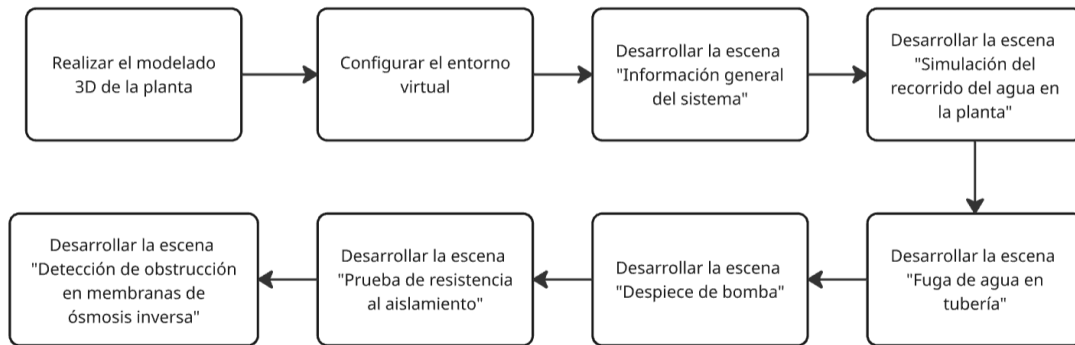
Se elaboró diversas escenas:

1. Información general de planta.
2. Simulación del recorrido del agua en la planta.
3. Fuga de agua en tubería.
4. Despiece de bomba.
5. Prueba de resistencia al aislamiento.
6. Detección de obstrucción en membranas de ósmosis inversa.

Para el desarrollo del proyecto se siguió el siguiente esquema, ver Figura 18.

Figura 18

Esquema general del desarrollo del proyecto

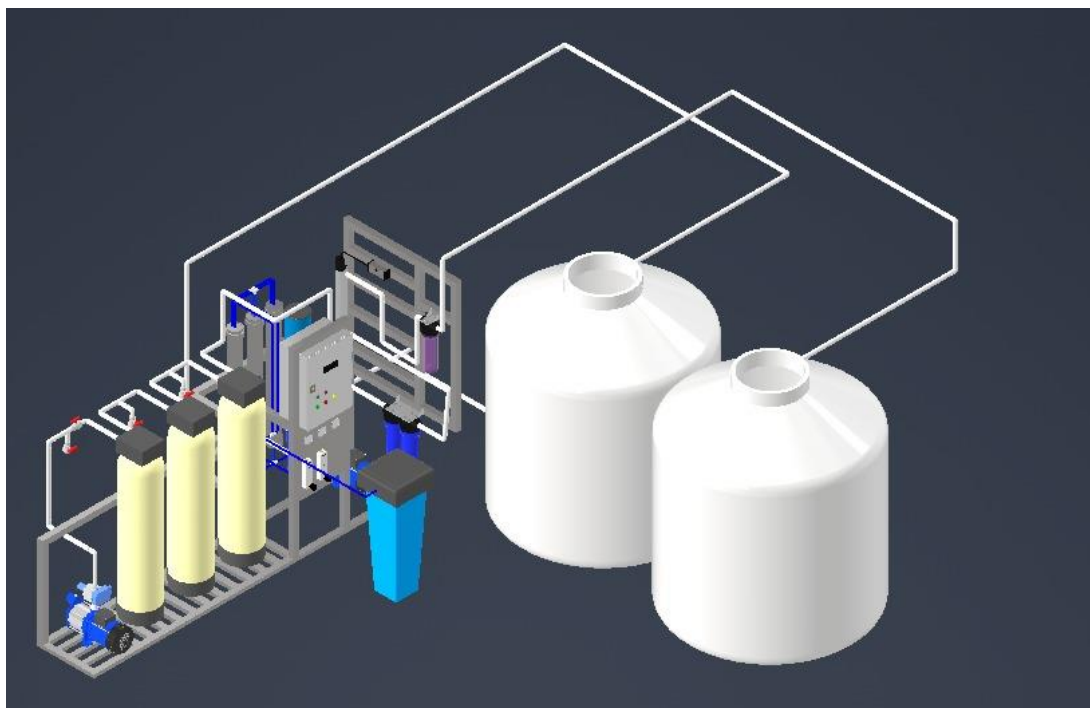


3.1.1 Modelado 3D de la planta

Para el desarrollo del modelado 3D de la planta se tuvo como referencia una planta física, como se observa en la Figura 1, ubicada en Piura, Perú. Para realizar las mediciones de los dispositivos se utilizó una cinta métrica y se consultó con sus respectivas fichas técnicas. Con esto, se obtiene información crucial sobre sus especificaciones y funcionamiento. Además, como se utilizó el software Autodesk Inventor Professional 2022 para el modelado, no solo se logró representar la geometría de la planta, sino también la conexión entre componentes incorporando detalles como tuberías, filtros, bombas, etc. Ver Figura 19.

Figura 19

Modelado de la planta de tratamiento de agua por ósmosis inversa



Una vez finalizado el modelo tridimensional, se realiza la exportación en formato OBJ, considerando la compatibilidad que dicho formato tiene con el motor de videojuegos utilizado. Posteriormente, se realiza el importado del modelado en OBJ a cada escenario creado en Unity. Como se observa en la Figura 20, el modelado se importa sin color y sin textura. Por ello, después se utiliza el software Substance Painter 3D, ver Figura 21, con la finalidad de que el modelado de planta y piezas de la bomba sean más realista, ya que se le brinda color y textura como se observa en la Figura 22.

Figura 20

Importado del modelado en Unity sin color ni textura

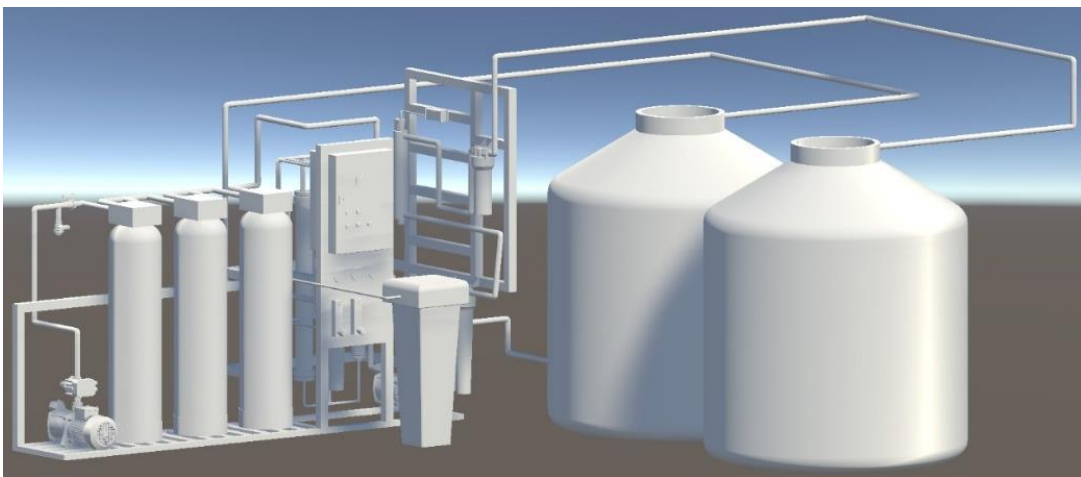


Figura 21

Selección de color y texturizado para el modelado en Substance Painter 3D

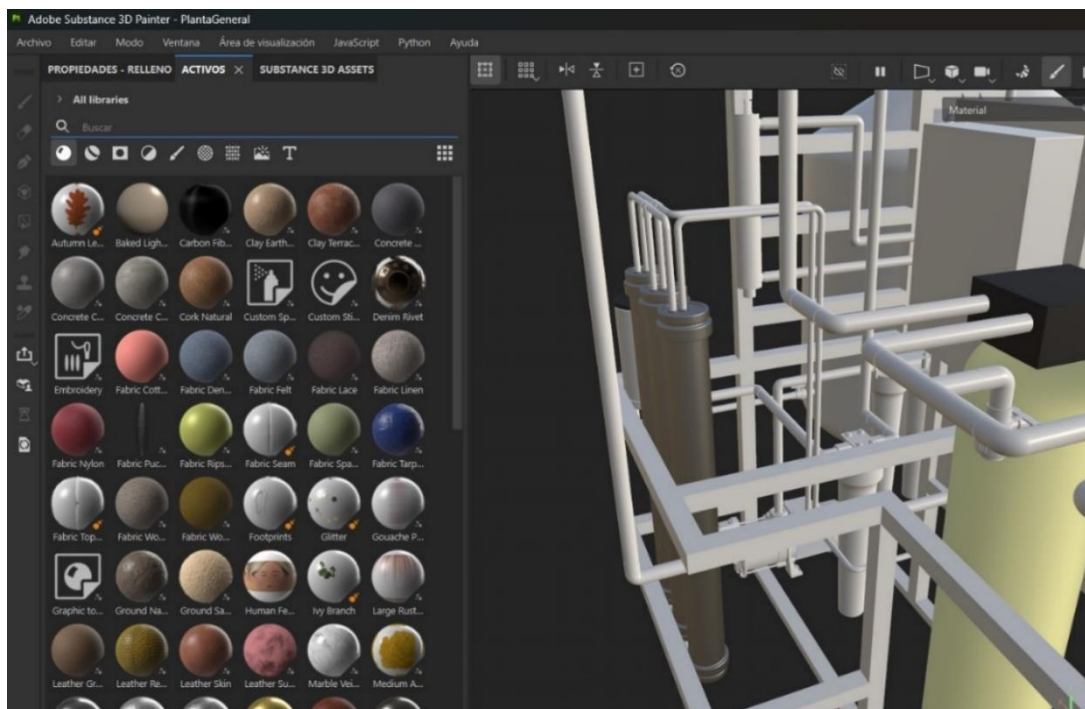
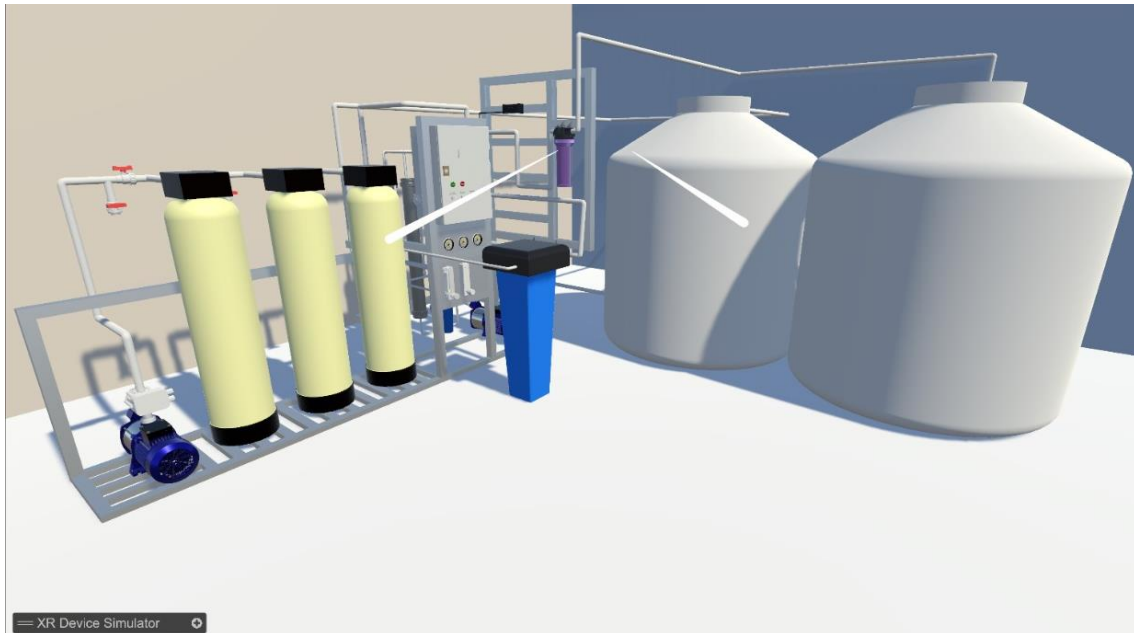


Figura 22

Modelado con la importación de color y textura del Substance Painter 3D



3.1.2 Configuración del entorno virtual

Para que los usuarios puedan interactuar de manera adecuada con la planta portátil de tratamiento de agua por ósmosis inversa, se deben realizar configuraciones básicas a los controles de VR, los movimientos del usuario, las interacciones con las herramientas, etc.

Se hizo uso del XR Interaction Toolkit para la creación de las interacciones en realidad virtual. Este kit de herramientas simplifica la implementación de interacciones comunes en entornos VR, como la manipulación de objetos, la interacción con interfaces de usuario y la navegación dentro de un espacio virtual. Las principales características de este kit para facilitar el desarrollo del proyecto son la interacción con objetos, el desplazamiento del usuario, el manejo de eventos para cada escenario y un soporte multiplataforma, el cual permite la funcionalidad entre Unity 3D y dispositivos compatibles como Meta Quest, HoloLens, entre otros. En cuanto al desplazamiento del usuario dentro de la escena, se utilizó del script Locomotion System, el cual permite un movimiento continuo mediante el joystick izquierdo para desplazarse y el joystick derecho para girar rápidamente la vista sin necesidad de girar físicamente. Esto reduce la fatiga física y mejora la experiencia inmersiva, permitiendo a los usuarios interactuar de forma más natural con el entorno virtual sin necesidad de caminar realmente.

Asimismo, cada objeto importado en el VR debe contener el componente Collider, el cual se utiliza para definir la forma física de un objeto y la detección de colisiones, así como

desencadenar interacciones como rebotes o activar eventos. Los objetos que tendrán interacción al momento de ser agarrados, se deben adicionar los componentes XR Grab Interactable y Rigidbody que permiten darle a un objeto un comportamiento físico.

3.1.3 Escenas desarrolladas en el entorno virtual

3.1.3.1 Escena de Información general de la planta

Este es el escenario principal donde el usuario puede explorar la planta cuando no está operativa. Además, se desarrolló paneles que serán visualizados al iniciar el escenario. En estos paneles, se mostrará información sobre el uso de los controles del Meta Quest2 en la escena y sobre el uso de EPP a utilizar.

Al momento de seleccionar cada dispositivo, automáticamente le aparecerá una información general sobre el componente seleccionado. También, cuenta con un menú principal con las siguientes opciones:

- Cómo usar los controladores en la escena.
- Simulación del recorrido del agua en la planta.
- Fuga de agua en tubería.
- Despiece de bomba.
- Prueba de resistencia al aislamiento.
- Detección de obstrucción en membranas de ósmosis inversa.
- Evaluación.
- Uso de EPP.

Cuando se selecciona la opción “Cómo usar los controladores en la escena”, se le mostrará la información necesaria para que el usuario pueda manipular los controles del Meta Quest 2.

Las opciones “Simulación del recorrido del agua en la planta”, “Fuga de agua en tubería”, “Despiece de bomba”, “Prueba de resistencia al aislamiento” y “Detección de obstrucción en membranas de ósmosis inversa” cuentan con un script incorporado en su configuración, el cual permite realizar el cambio de escena. Cada una está vinculada al nombre del escenario correspondiente, de modo que, al seleccionarlas, el sistema carga automáticamente la escena asignada.

Para la implementación de la evaluación, primero se mostrará un panel al usuario con las indicaciones donde especifica la cantidad de preguntas y el tiempo que se tomará al iniciar

dicha evaluación. Posteriormente, aparecerá un nuevo panel en donde se programó un teclado virtual que permite al usuario ingresar su nombre y apellido antes de iniciar la evaluación.

La lógica de la evaluación se desarrolló en un script que contiene un banco de preguntas, del cual se seleccionan 10 de forma aleatoria para que el usuario las responda. En ese mismo script se programó un diccionario de preguntas y respuestas, donde cada pregunta está vinculada con sus 3 alternativas de respuesta, y además se programó un diccionario que vincula cada pregunta con su respuesta correcta para poder realizar la validación de la calificación del usuario. Cada pregunta se muestra en un panel independiente y conforme el usuario vaya pasando a la siguiente pregunta, el panel anterior se desactiva para no aparecer nuevamente.

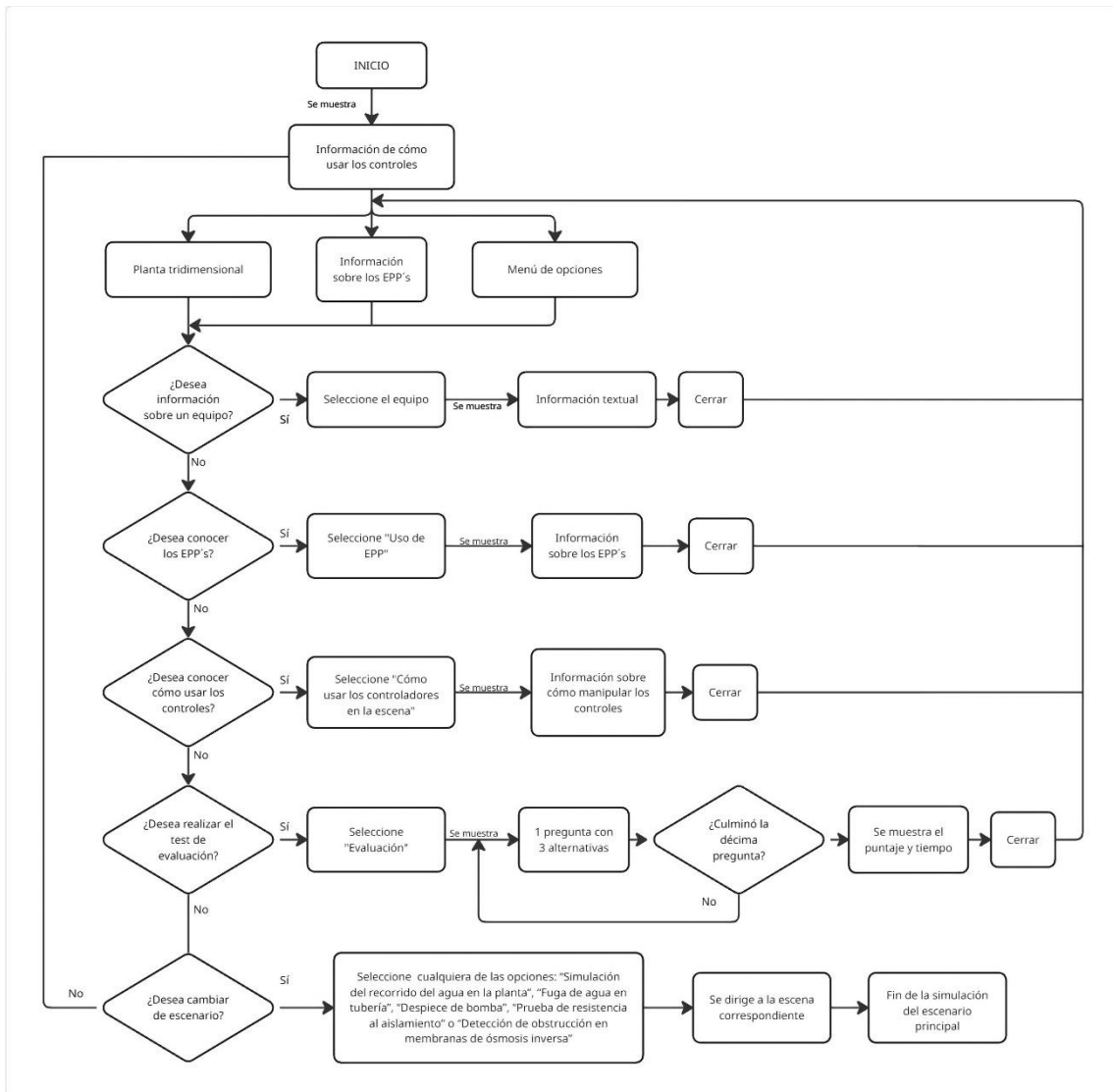
Al finalizar la evaluación, se mostrará un panel de resumen que indica el nombre y apellido del usuario, la calificación obtenida y el tiempo total empleado durante la evaluación. Además, como parte de la programación, se genera un archivo de Excel que registra de manera independiente los datos de cada usuario evaluado, incluyendo sus nombres y apellidos.

Con la opción “Uso de EPP”, primero se muestra al usuario mediante un panel los equipos de protección personal que debe utilizar, acompañado de una breve descripción de cada uno. Posteriormente, se presenta una imagen de referencia que muestra cómo debería lucir el usuario al portar correctamente todos los EPP.

La lógica de este escenario se puede observar en la Figura 23.

Figura 23

Diagrama de flujo del escenario principal



3.1.3.2 Escena de Simulación del recorrido del agua en la planta

En este escenario el usuario podrá calcular el flujo de permeado total (agua purificada). Para ello, se deberá colocar el valor del flujo que entra en las membranas. Por otra parte, se podrá calcular cuándo se debe regenerar la resina que se encuentra en el filtro suavizador, ingresando los valores de la capacidad del suavizador (pie cúbico) y la dureza del agua (ppm).

3.1.3.2.1 Cálculo de regeneración del suavizador

Para determinar cuándo se debe regenerar el suavizador se tiene en cuenta la capacidad de almacenamiento de resina y la dureza del agua expresada en granos por galón. Para el cálculo se considera que un pie cúbico de resina tiene 25000 granos a 9 libras de sal.

Para realizar los cálculos, primero se debe encontrar un factor de conversión que se exprese en partes por millón (ppm).

Se determina las partes por millón (ppm) que contiene el agua. Para ello, se utiliza la ecuación 1.

$$\text{Factor}_{\text{conversión}} = \frac{1\text{granos}}{1\text{gal}} \times \frac{1\text{g}}{15.4324\text{granos}} \times \frac{1000\text{mg}}{1\text{g}} \times \frac{1\text{gal}}{3.785\text{L}} = \frac{17.1\text{mg}}{\text{L}} \quad (1)$$

Donde:

$\text{Factor}_{\text{conversión}}$ = Partes por millón (ppm) de dureza que entrará al suavizador.

Desarrollando la ecuación 1, se obtiene su resultado en la ecuación 2.

$$\text{Factor}_{\text{conversión}} = 17.1 \text{ ppm} \quad (2)$$

Ahora se debe convertir la ppm a granos por galón de dureza.

Para obtener los granos por galón de dureza que se encuentran en el agua se utiliza la ecuación 3.

$$w = \text{Dureza} \times \frac{\frac{1\text{granos}}{1\text{gal}}}{\text{Factor}_{\text{conversión}}} \times \text{Factor}_{\text{compensación}} \quad (3)$$

Donde:

w = Granos por galón de dureza (gpg).

Dureza = Son las partes por millón que contiene el agua (ppm).

$\text{Factor}_{\text{compensación}}$ = Dato que proporciona el proveedor y su valor es de 1.1.

Utilizando la Tabla 1 se obtendrá la cantidad total de granos “Gt”. Este valor dependerá de la capacidad del suavizador, el cual se mide en pies cúbicos.

Tabla 1

Característica de los suavizadores

Suavizador	Capacidad	Flujo Normal
1 pie cúbico	25,000 granos	5 gpm
1.5 pies cúbicos	37,500 granos	7.50 gpm
2 pies cúbicos	50,000 granos	10 gpm
2.5 pies cúbicos	62,500 granos	12.5 gpm
3 pies cúbicos	75,000 granos	15 gpm
4 pies cúbicos	100,000 granos	20 gpm
5 pies cúbicos	125,000 granos	25 gpm
7 pies cúbicos	175,000 granos	35 gpm
10 pies cúbicos	250,000 granos	50 gpm

Nota. De “Cálculo de suavizadores de agua”, por PURIKOR, s.f. (<https://surl.lu/lfmsyz>).

Cuando se obtiene la cantidad de granos totales en la resina y la dureza expresada en granos por galón se procede a utilizar la ecuación 4. Con esta ecuación se determina la producción que realiza el suavizador entre cada suavizado.

$$\frac{Gt}{w} = y \quad (4)$$

Gt = Capacidad total de granos que posee el suavizador.

y = Producción, en galones, entre cada regeneración (gal).

En caso la empresa produzca bidones de 20L, se utiliza el resultado de la ecuación 4 en la ecuación 5.

$$y \times \frac{3.785L}{1gal} \times \frac{1 \text{ bidón}}{20L} = bt \quad (5)$$

bt = Número de bidones de 20 L.

Por lo tanto, se debe regenerar cuando el suavizador produzca una cantidad de “y” galones o un número de bidones de “bt”.

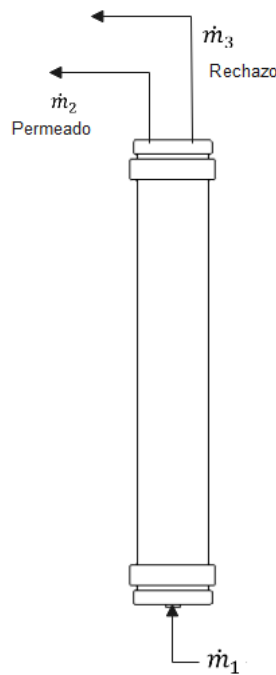
3.1.3.2.2 Cálculo de la conservación de masas en membranas de ósmosis inversa

Se debe tener en cuenta que el área de las tuberías de entrada y salidas de las membranas son iguales, donde el radio de las tuberías es 12.7mm.

Para realizar el balance de masas en la primera membrana se debe tener en cuenta la Figura 24. Teniendo en cuenta esto, se aplica la ecuación 6 para la primera membrana. Al realizar las sustituciones correspondientes, se obtiene el resultado en la ecuación 7.

Figura 24

Membrana N°1



$$\sum_{ent} \dot{m} = \sum_{sal} \dot{m} \quad \dots (6)$$

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal}$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$$

$$\rho \times v_{ent} \times A_{ent} = \rho \times v_{sal} \times A_{sal}$$

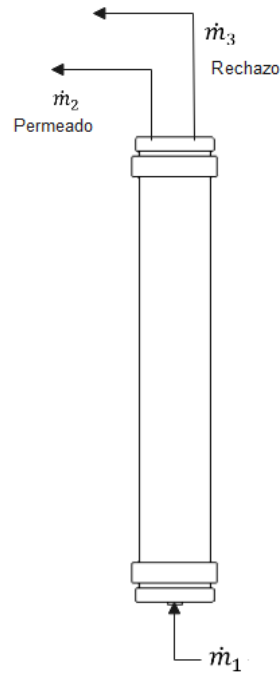
$$v_1 \times A_1 = v_2 \times A_2 + v_3 \times A_3$$

$$v_1 = v_2 + v_3 \quad (7)$$

Para realizar el balance de masas en la segunda membrana se debe tener en cuenta la Figura 25. Teniendo en cuenta esto, se aplica la ecuación 8 para la primera membrana. Al realizar las sustituciones correspondientes, se obtiene el resultado en la ecuación 9.

Figura 25

Membrana N°2



$$\sum_{ent} \dot{m} = \sum_{sal} \dot{m} \quad \dots (8)$$

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal}$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$$

$$\rho \times v_{ent} \times A_{ent} = \rho \times v_{sal} \times A_{sal}$$

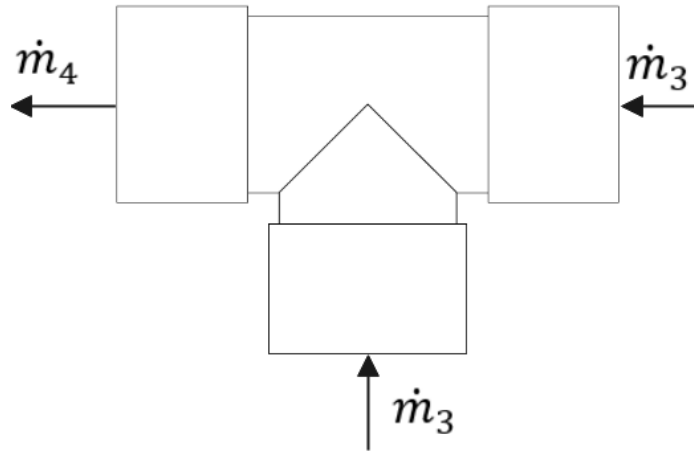
$$v_1 \times A_1 = v_2 \times A_2 + v_3 \times A_3$$

$$v_1 = v_2 + v_3 \quad (9)$$

Para realizar el balance de masas en el primer conector se debe tener en cuenta la Figura 26. Teniendo en cuenta esto, se aplica la ecuación 10 para la primera membrana. Al realizar las sustituciones correspondientes, se obtiene el resultado en la ecuación 11.

Figura 26

Primer conector de 3 uniones



$$\sum_{ent} \dot{m} = \sum_{sal} \dot{m} \quad \dots (10)$$

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal}$$

$$2\dot{m}_3 = \dot{m}_4$$

$$\rho \times v_{ent} \times A_{ent} = \rho \times v_{sal} \times A_{sal}$$

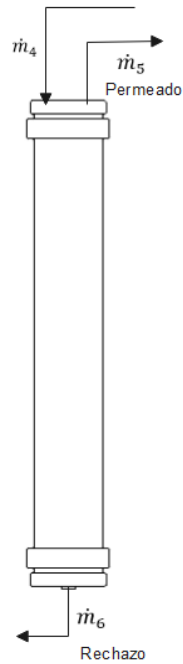
$$v_3 \times A_3 + v_3 \times A_3 = v_4 \times A_4$$

$$2v_3 = v_4 \quad (11)$$

Para realizar el balance de masas en la tercera membrana se debe tener en cuenta la Figura 27. Teniendo en cuenta esto, se aplica la ecuación 12 para la primera membrana. Al realizar las sustituciones correspondientes, se obtiene el resultado en la ecuación 13.

Figura 27

Membrana N°3



$$\sum_{ent} \dot{m} = \sum_{sal} \dot{m} \quad \dots (12)$$

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal}$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 + \dot{m}_6$$

$$\rho \times v_{ent} \times A_{ent} = \rho \times v_{sal} \times A_{sal}$$

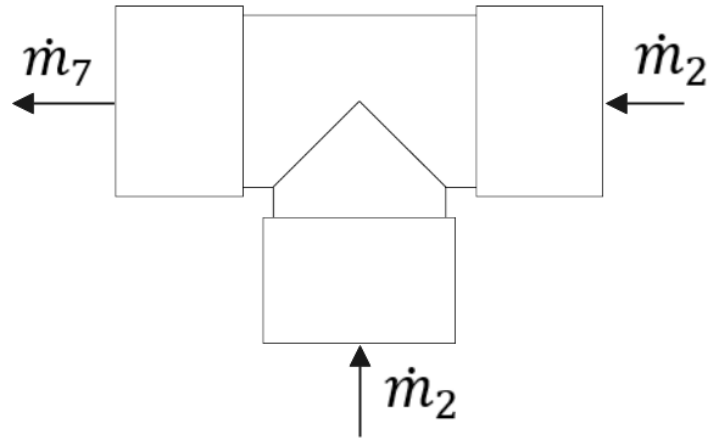
$$v_4 \times A_4 = v_5 \times A_5 + v_6 \times A_6$$

$$v_4 = v_5 + v_6 \quad (13)$$

Para realizar el balance de masas en el segundo conector se debe tener en cuenta la Figura 28. Teniendo en cuenta esto, se aplica la ecuación 14 para la primera membrana. Al realizar las sustituciones correspondientes, se obtiene el resultado en la ecuación 15.

Figura 28

Segundo conector de 3 uniones



$$\sum_{ent} \dot{m} = \sum_{sal} \dot{m} \quad \dots (14)$$

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal}$$

$$2\dot{m}_2 = \dot{m}_7$$

$$\rho \times v_{ent} \times A_{ent} = \rho \times v_{sal} \times A_{sal}$$

$$v_2 \times A_2 + v_2 \times A_2 = v_7 \times A_7$$

$$2v_2 = v_7 \quad (15)$$

Cada membrana tiene una recuperación del 15% (R) y trabaja a una presión de 150 psi. La recuperación de la membrana se define en la ecuación 16. En la ecuación 17, se brinda la formula del flujo de alimentación en cada membrana.

$$R = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100\% \quad (16)$$

$$Q_f = Q_p + Q_c \quad (17)$$

Donde:

Q_f = Flujo de alimentación en cada membrana.

Q_p = Flujo de permeado en cada membrana.

Q_c = Flujo de concentrado o rechazo en cada membrana.

R = Recuperación de cada membrana.

En la ecuación 18 se brinda la fórmula para la recuperación, asimismo, en la ecuación 19 se muestra la formula para el flujo de alimentación del sistema.

$$R_t = \frac{Q_{pt}}{Q_{ft}} \times 100\% \quad (18)$$

$$Q_{ft} = Q_{pt} + Q_{ct} \quad (19)$$

Donde:

Q_{ft} = Flujo de alimentación del sistema.

Q_{pt} = Flujo de permeado del sistema.

Q_{ct} = Flujo de concentrado o rechazo del sistema.

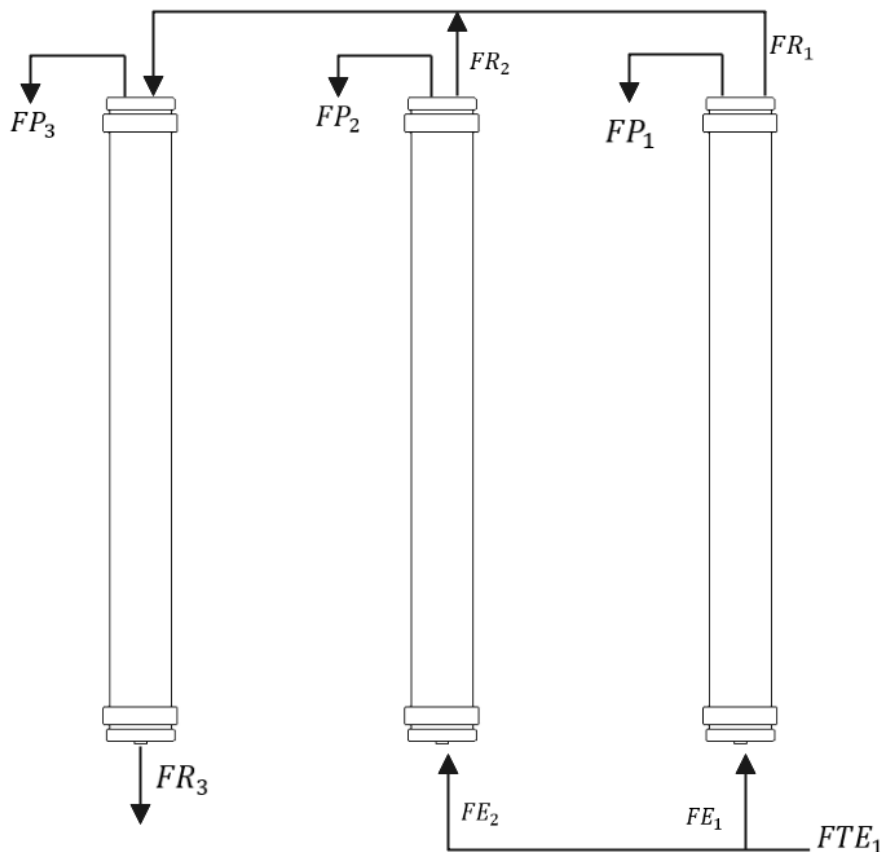
R_t = Recuperación del sistema.

3.1.3.2.3 Cálculo del flujo de salida en el sistema de membranas de ósmosis inversa

En la Figura 29 se muestra la composición del sistema de membranas presentes en el entorno virtual.

Figura 29

Sistema de membranas presentes en el entorno virtual



Se tiene en consideración lo siguiente:

$$FE_1 = FE_2 \quad (20)$$

$$FR_1 = FR_2 \quad (21)$$

$$FP_1 = FP_2 \quad (22)$$

Donde:

FP_1 = Flujo de permeado de la membrana 1.

FP_2 = Flujo de permeado de la membrana 2.

FP_3 = Flujo de permeado de la membrana 3.

FR_1 = Flujo de rechazo de la membrana 1.

FR_2 = Flujo de rechazo de la membrana 2.

FR_3 = Flujo de rechazo de la membrana 3.

FE_1 = Flujo de entrada de la membrana 1.

FE_2 = Flujo de entrada de la membrana 2.

Como se desea que la producción del permeado sea de 8000L en 8 h, se tiene en consideración la ecuación 23.

$$FP_3 + FP_2 + FP_1 = 1000 \frac{L}{h} \quad \dots (23)$$

Reemplazando la ecuación 22 en la ecuación 23 se obtiene:

$$FP_3 + 2 \times FP_1 = 1000 \frac{L}{h} \quad (24)$$

$$FR_1 = FE_1 \times 0.85 \quad (25)$$

$$FE_3 = 2 \times FR_1 \quad (26)$$

Donde:

FE_3 : Flujo de alimentación de la membrana 3.

FP_3 : Flujo de permeado de la membrana 3.

Reemplazando la ecuación 25 en la ecuación 26 se obtiene:

$$FE_3 = 2 \times FE_1 \times 0.85 \quad (27)$$

$$FP_3 = 0.15 \times FE_3 \quad (28)$$

Reemplazando la ecuación 27 en la ecuación 28 se obtiene:

$$FP_3 = 0.15 \times 2 \times FE_1 \times 0.85$$

$$FP_3 = 0.255 \times FE_1 \quad (29)$$

$$FP_1 = FE_1 \times 0.15 \quad (30)$$

Reemplazando la ecuación 27 y la ecuación 28 en la ecuación 23 se obtiene:

$$0.255 \times FE_1 + 2 \times (0.15 \times FE_1) = 1000 \frac{L}{h} \quad (31)$$

Se obtiene el FE_1 y FE_2 :

$$FE_1 = \frac{1000 \frac{L}{h}}{0.555} = 1801.80 \frac{L}{h} = 11423.64 \text{ GPD}$$

Con este resultado, se obtiene el flujo total en la entrada del sistema de membranas:

$$FTE_1 = FE_1 + FE_2 = 3603.6 \frac{L}{h} = 22847.28 \text{ GPD}$$

Reemplazando en cada ecuación se obtienen los siguientes resultados:

$$FP_1 = Q_{FP_1} = 270.270 \frac{L}{h} = 1715 \text{ GPD}$$

$$FP_2 = 270.270 \frac{L}{h} = 1715 \text{ GPD}$$

$$FP_3 = 459.459 \frac{L}{h} = 2913 \text{ GPD}$$

Con (20) se halla la recuperación total del sistema:

$$Q_{ft} = Q_{pt} + Q_{ct}$$

$$Q_{pt} = Q_{FP_1} + Q_{FP_2} + Q_{FP_3} = 1000 \frac{L}{h}$$

$$Q_{ft} = Q_{FE_1} + Q_{FE_2} = 3603.6 \frac{L}{h}$$

$$R_t = \frac{1000 \frac{L}{h}}{3603.6 \frac{L}{h}} \times 100\%$$

$$R_t = 27.75\%$$

Para seleccionar el modelo de la membrana se realiza en base a su flujo de permeado.

Para la membrana 1 y 2:

$$Q_{FP_1} = 1715 \text{ GPD}$$

$$Q_{FP_2} = 1715 \text{ GPD}$$

$$Q_{pc1} = Q_{FP_1} \times \frac{225}{150}$$

$$Q_{pc1} = 2572.5 \text{ GPD}$$

Para la membrana 3:

$$Q_{FP_3} = 2913 \text{ GPD}$$

$$Q_{pc3} = Q_{FP_3} \times \frac{225}{150}$$

$$Q_{pc3} = 4369.5 \text{ GPD}$$

Donde:

Q_{pc1} , Q_{pc3} : Flujo de permeado comercial para cada membrana.

En este escenario el usuario visualizará el recorrido que realiza el agua por la planta.

Además, cuenta con las siguientes opciones:

- Cómo usar los controladores en la escena.
- Flujo de permeado ingresando el flujo de entrada.
- Cuando regenerar la resina del filtro suavizador.
- Volver al escenario principal.

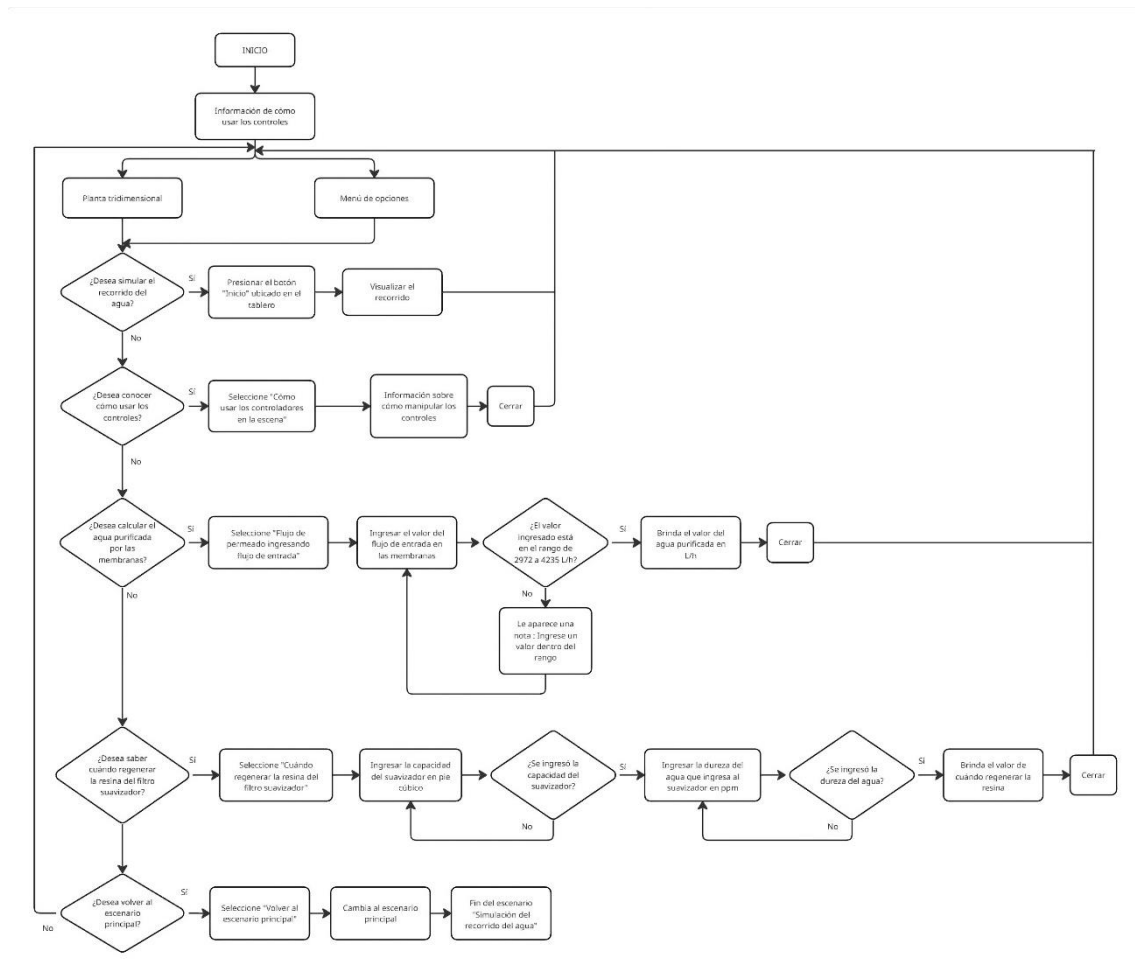
Al seleccionar “Flujo de permeado ingresando el flujo de entrada”, se le mostrará un panel indicando que ingrese el valor del flujo en la entrada de la membrana. Además, se le recalca que el valor ingresado debe ser del rango de 2972 (L/h) a 4235 (L/h). Luego, siguiendo los cálculos mostrados anteriormente, se le brinda una respuesta.

Cuando presiona sobre “Cuándo regenerar la resina del filtro suavizador”, se mostrará un panel al usuario indicándole que ingrese los valores de la capacidad del suavizador en pie cúbico y la dureza del agua en ppm.

La lógica de este escenario se puede observar en la Figura 30.

Figura 30

Diagrama de flujo del escenario “Recorrido del agua”



3.1.3.3 Escena de Fuga de agua en tubería

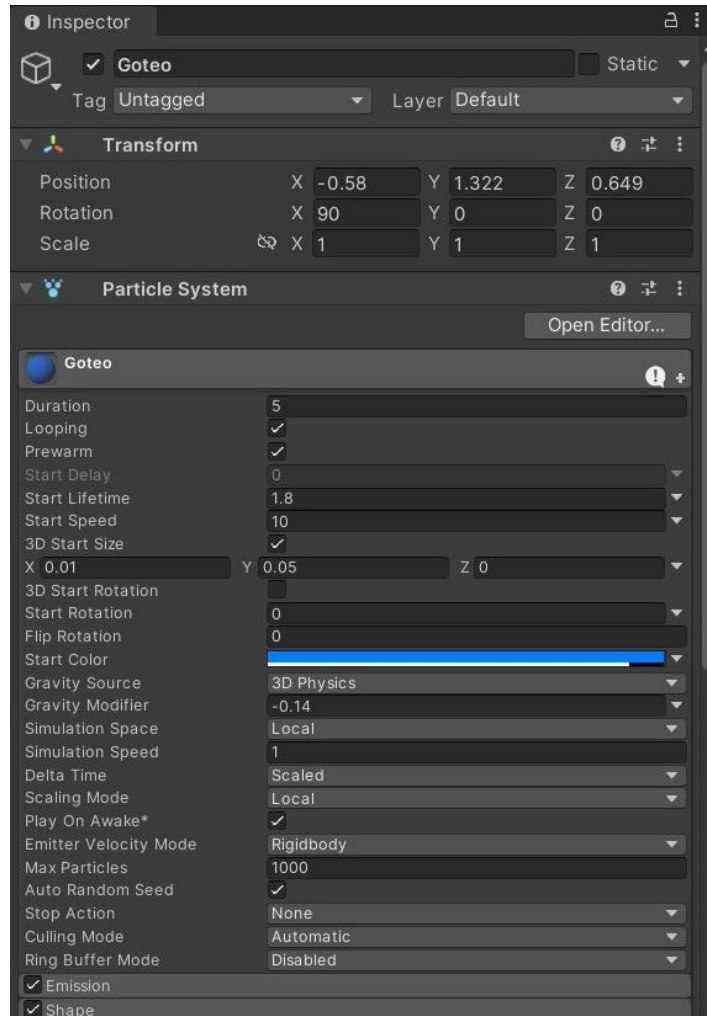
En este escenario se visualizará el funcionamiento del sistema, mostrando un problema de fuga de agua en una de las tuberías.

Se simuló la fuga utilizando el componente Particle System de Unity. Para representar el flujo de agua, se configuraron parámetros específicos como la duración, velocidad inicial, tamaño de las partículas y dirección del movimiento, visualizados en la Figura 31, logrando así un efecto visual similar al goteo o caída continua del líquido. Asimismo, se aplicó un color azul al material de las partículas para asemejar el tono característico del agua. El sistema de partículas fue ajustado para reproducirse en bucle (Looping) y con

física 3D activada, de modo que su comportamiento resultara más natural dentro del entorno.

Figura 31

Configuración para simular el goteo de agua



Se diseñó un panel informativo que presenta las instrucciones sobre el uso de los controles en la escena. Asimismo, se configuró el entorno virtual para representar la planta en condiciones operativas evidenciando una fuga en una de sus tuberías. Tanto el panel informativo como la simulación de la planta se encuentran visibles desde el inicio del escenario, facilitando la comprensión del entorno y las acciones a realizar.

Durante toda la simulación, el sistema virtual brinda asistencia al usuario mediante cuadros informativos que lo guían paso a paso en las acciones a realizar. Estos cuadros fueron diseñados utilizando elementos de la interfaz de usuario (UI) de Unity y programados para activarse de forma secuencial conforme avanza la interacción del usuario.

En primer lugar, el sistema indica al usuario que debe identificar la fuga de agua y, posteriormente, cerrar la válvula de alimentación. Para ello, se desarrolló un script que detecta la rotación del objeto “válvula de alimentación”, de modo que, al alcanzar un rango específico de giro, se ejecuta una instrucción que detiene la simulación de la fuga del agua.

Posteriormente, se muestra una instrucción para abrir el tablero eléctrico y bajar la llave del interruptor general. De esta manera, se desenergiza la bomba con el propósito de impedir el flujo de agua al sistema hasta que se realice el cambio de tubería. Una vez completada esta acción, el sistema notifica al usuario que puede proceder con el reemplazo de la tubería afectada.

Dentro del tablero eléctrico se incorporó un diagrama de control, diseñado para representar el circuito de mando. Este diagrama reproduce un esquema típico de control de bomba, conformado por pulsadores de “Inicio” y “Stop”, un contactor y lámparas de señalización que indican los estados de encendido y detenido.

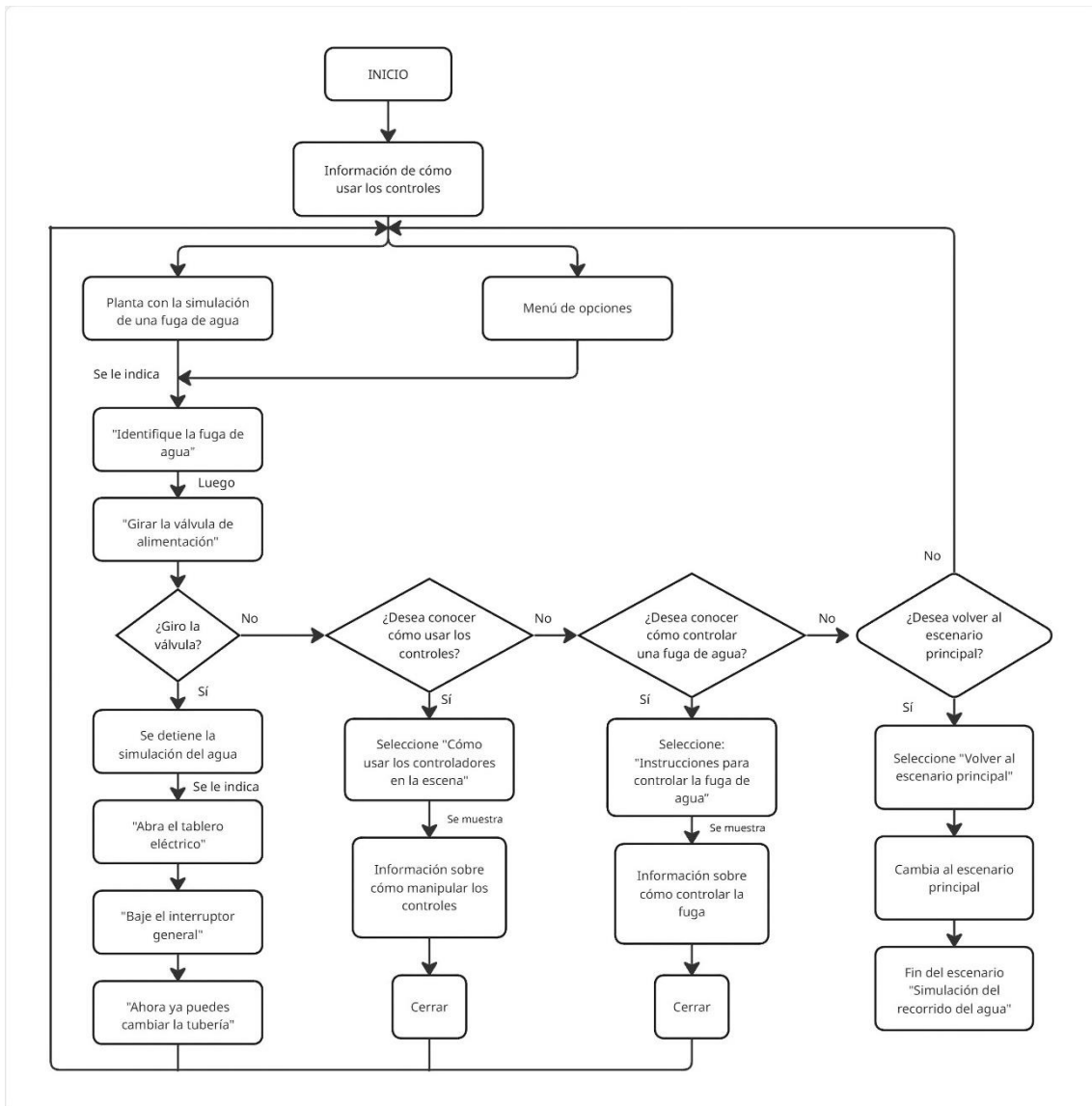
El menú de este escenario cuenta con las siguientes opciones:

- Cómo usar los controladores en la escena.
- Cómo identificar si hay una fuga de agua.
- Instrucciones para controlar la fuga de agua.
- Volver al escenario principal.

La lógica de este escenario se puede observar en la Figura 32.

Figura 32

Diagrama de flujo del escenario “Fuga de agua en tubería”



3.1.3.4 Escena de Despiece de bomba

En este escenario, el usuario visualizará una mesa de trabajo donde se mostrará la bomba junto con las herramientas correspondientes para el desmontaje de cada una de sus piezas. Para ello, se implementó una codificación jerárquica y condicional que relaciona las piezas de la bomba con las herramientas necesarias para su correcto desensamble.

La primera herramienta a utilizar es el destornillador, el cual se resalta en color verde para que el usuario pueda identificar fácilmente con qué herramienta comenzar y proceder al retiro de los tornillos. Una vez que el usuario selecciona el destornillador vuelve a su color original y se ejecuta la codificación jerárquica entre esta herramienta y las piezas

que dependen de ella, tal como se muestra en la Figura 33. Dichas piezas se iluminan en verde para indicar que deben ser retiradas por la herramienta.

Para simular las acciones de agarre, giro y liberación de los tornillos mediante el destornillador, se configuró el “Input Action Manager” de Unity, permitiendo que dichas interacciones se realicen mediante los botones de los mandos del Meta Quest 2.

Cuando el usuario termina de retirar todos los tornillos asociados al destornillador, se activa la codificación condicional de las piezas, como se muestra en la Figura 34. En este paso, se resalta en color verde la siguiente pieza que debe ser desmontada.

Este proceso continúa de manera secuencial para todas las piezas de la bomba, hasta llegar al retiro de los rodamientos con la ayuda del extractor, dejando finalmente el eje de la bomba completamente libre.

Posteriormente, una vez finalizado el desensamble, el usuario dispone en la parte derecha de la pantalla de un panel con una guía de ensamblaje de la bomba. En esta sección se reproduce un video exportado desde Autodesk Inventor, generado a partir de la animación explosionada de las piezas. Durante la reproducción, el usuario puede interactuar con los botones de pausa, sonido y desplazamiento, lo que le permite avanzar o retroceder según sus necesidades.

El menú de este escenario cuenta con las siguientes opciones:

- Cómo usar los controladores en la escena.
- Observar vídeo de guía para el ensamblado.
- Volver al escenario principal.

Figura 33

Configuración del script de jerarquía entre las herramientas y sus piezas dependientes

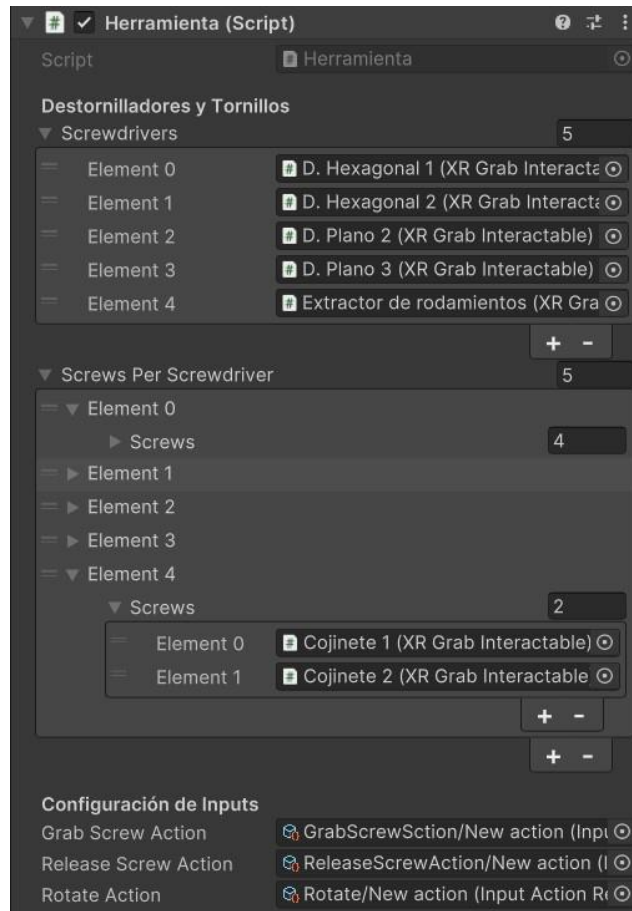
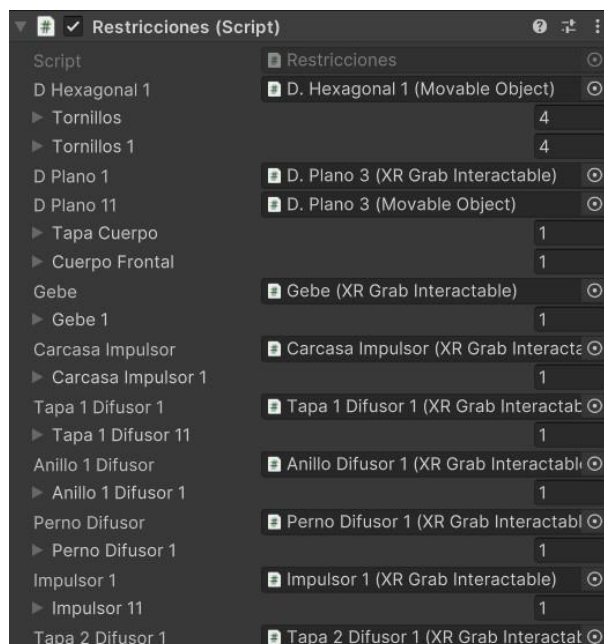


Figura 34

Configuración del script condicional para el desensamble de la bomba



3.1.3.5 Escena de Prueba de resistencia de aislamiento

En este escenario, el usuario visualizará la planta en funcionamiento en el cual se diseñó paneles guía que indican paso a paso las acciones a realizar. Inicialmente, se mostrará el mensaje “Abrir Tablero”; una vez completada esta acción, aparecerá la instrucción “Bajar Interruptor”. Cuando la planta quede desenergizada, el sistema indicará al usuario que se dirija hacia la bomba.

Después de completar los pasos anteriores y acercarse a la bomba, se mostrará un panel con las opciones “Ver especificaciones” y “Medición de la resistencia”. Al seleccionar “Medición de la resistencia”, el usuario será trasladado a una nueva escena donde la bomba se encuentra sobre una mesa de trabajo, junto con las herramientas necesarias para abrir la caja de conexiones y unas pinzas destinadas a medir la resistencia de aislamiento.

Además, se incorporó un panel en la parte derecha de la mesa de trabajo con las opciones “Placa de conexiones del motor”, “Tipos de medición de la resistencia de aislamiento” y “Especificaciones de la bomba”, las cuales el usuario puede consultar en cualquier momento.

Para el desarrollo de esta interacción, se implementó una codificación jerárquica y condicional que relaciona los tornillos de la caja de conexiones con el destornillador, así como la secuencia de piezas que deben retirarse para realizar correctamente la medición de la resistencia de aislamiento.

El destornillador se resalta en color verde para que el usuario pueda identificar fácilmente con qué herramienta comenzar y proceder al retiro de los tornillos de la caja de conexiones. Una vez que el usuario selecciona el destornillador vuelve a su color original y se ejecuta la codificación jerárquica entre esta herramienta y los tornillos que dependen de ella, tal como se muestra en la Figura 35. Dichas piezas se iluminan en verde para indicar que deben ser retirados con el destornillador.

Para simular las acciones de agarre, giro y liberación de los tornillos mediante el destornillador, se configuró el “Input Action Manager” de Unity, permitiendo que dichas interacciones se realicen mediante los botones de los mandos del Meta Quest 2.

Una vez retirados todos los tornillos asociados al destornillador, se activa la codificación condicional, como se muestra en la Figura 36. En este paso, se resalta en color verde la siguiente pieza a desmontar que es la tapa de la caja de conexiones. Posteriormente, el

usuario deberá retirar los puentes de conexión y las tuercas de dichos puentes hasta dejar completamente expuestas las bobinas del motor.

Al finalizar el desmontaje, las pinzas se resaltarán en verde, indicando que están disponibles para realizar la medición de la resistencia de aislamiento. Antes de realizar esta acción, el usuario deberá consultar en el panel ubicado al lado derecho los tipos de medición que debe efectuar.

Para obtener el valor de la resistencia de aislamiento, se asignó un script a cada pinza que detecta si existe contacto con las bobinas o la carcasa del motor (tierra). Se definieron tres variables booleanas: una por cada bobina y una adicional para la carcasa.

Asimismo, a cada bobina y carcasa del motor del modelado se les asignó un TAG específico: “Bobina 1”, “Bobina 2” y “GND”, lo que permite validar la detección de contacto de las pinzas. Cuando una pinza entra en contacto con alguno de estos elementos, cambia de color a rojo para “Bobina 1”, azul para “Bobina 2” y negro para “GND” y volverán a su color original al perder el contacto con la pinza.

Finalmente, en el panel ubicado al lado izquierdo de la mesa de trabajo se muestran los valores de la resistencia de aislamiento obtenidos, calculados a partir de las tres variables booleanas de las pinzas, en función del tipo de medición realizado por el usuario entre las bobinas y la carcasa del motor.

El menú del primer escenario cuenta con las siguientes opciones:

- Cómo usar los controladores en la escena.
- Instrucciones para desenergizar el sistema.
- Volver al escenario principal.

El menú del segundo escenario cuenta con las siguientes opciones:

- Placa de conexiones del motor.
- Tipos de medición de la resistencia de aislamiento.
- Especificaciones de la bomba.

Figura 35

Configuración del script de jerarquía entre el destornillador y sus tornillos

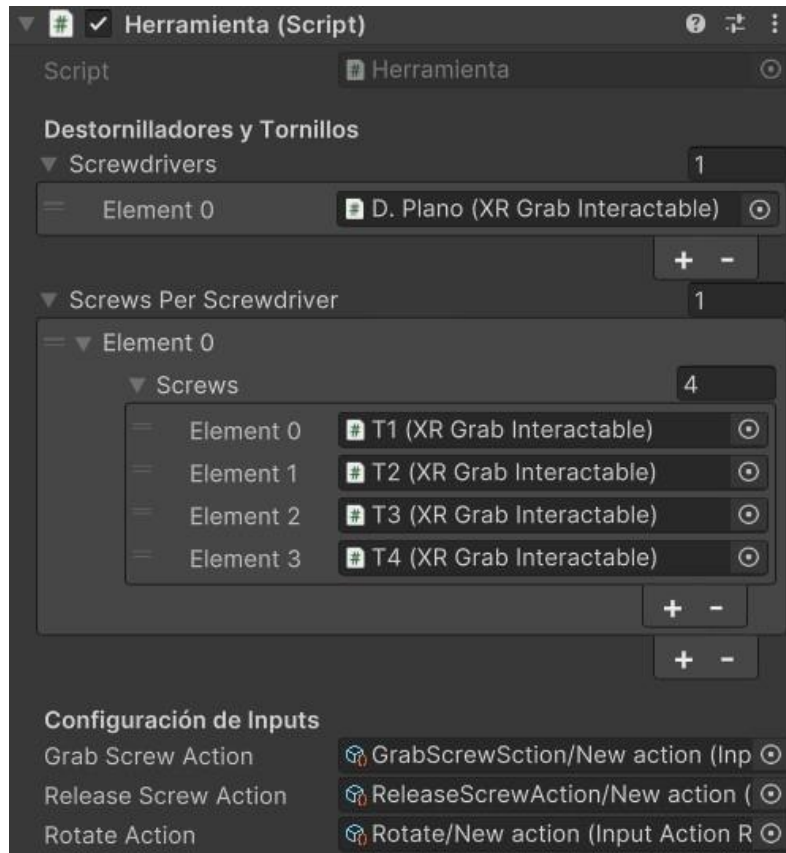
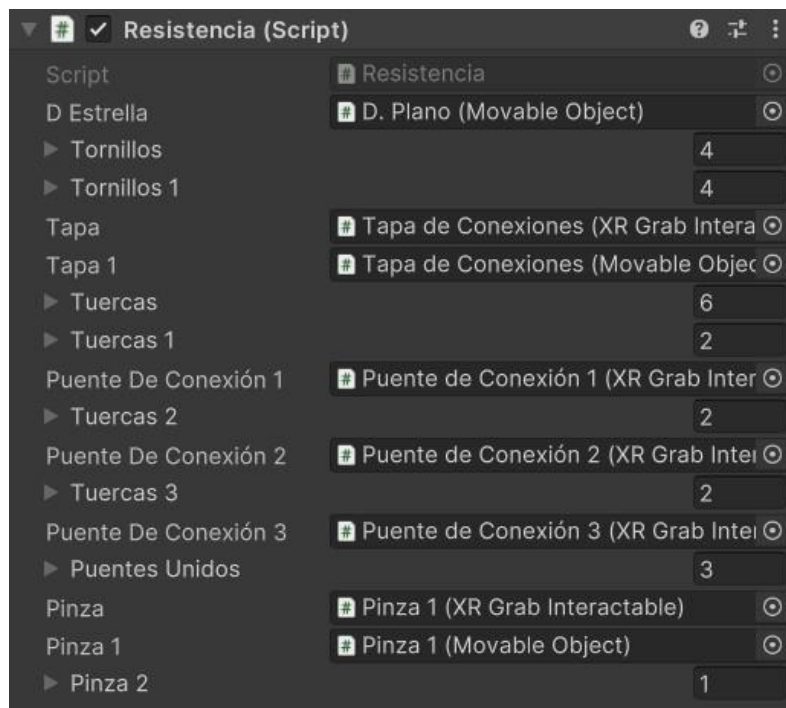


Figura 36

Configuración del script condicional para el desensamble de la caja de conexiones



En la Tabla 2 se muestra la tensión de prueba recomendada para medir la resistencia de aislamiento según el voltaje nominal del devanado. A medida que aumenta el voltaje nominal de la máquina, también aumenta el rango de voltaje de corriente continua que debe aplicarse durante la prueba de resistencia de aislamiento.

Tabla 2

Voltajes que deben aplicarse durante la prueba de aislamiento

Voltaje Nominal del devanado	Tensión de prueba de resistencia de aislamiento
<1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

Nota. De "IEEE recommended practice for testing insulation resistance of electric machinery (IEEE Std 43-2013)", por IEEE, 2014. (<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6754111>).

En la Tabla 3 se muestra los valores mínimos recomendados de resistencia de aislamiento (IR_{1min}) para diferentes tipos de devanados según su año de fabricación y tipo de construcción.

Tabla 3

Valores mínimos de resistencia de aislamiento a 40°C en $M\Omega$

Resistencia mínima del aislamiento	Muestra de prueba
$IR_{1min} = Kv + 1$	Para la mayoría de devanados de antes de 1970, todos los devanados de campo, y otros nos descritos.
$IR_{1min} = 5$	Para la mayoría de armaduras de CC y devanados de CA construidos después de 1970 (bobinas preformadas).
$IR_{1min} = 100$	Para la mayoría de las máquinas con bobinas del estator bobinadas al azar y bobinas preformadas con rango inferior 1kV.

Nota. De "IEEE recommended practice for testing insulation resistance of electric machinery (IEEE Std 43-2013)", por IEEE, 2014. (<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6754111>).

En la Tabla 4 se muestra los valores mínimos recomendados del índice de polarización (P.I.) según la clase térmica del aislamiento en máquinas eléctricas rotativas.

Tabla 4

Valores mínimos del índice de polarización

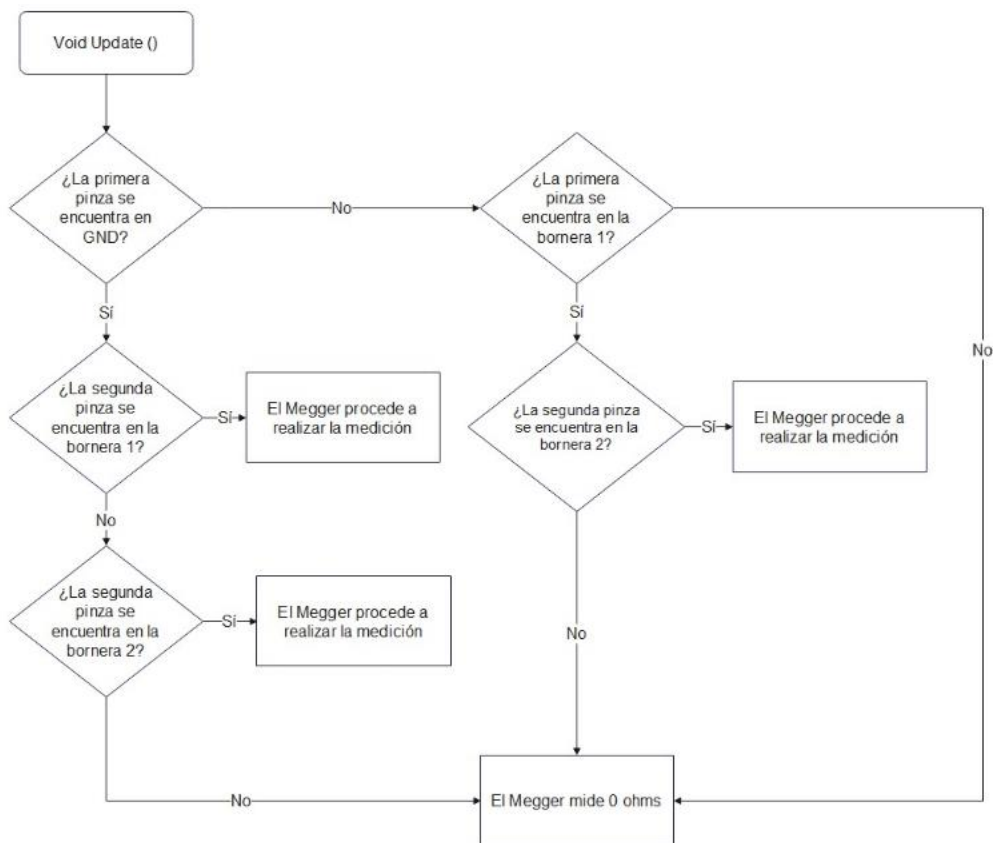
Clase Térmica	Valor mínimo P.I.
CLASE A	1.5
CLASE B	2.0
CLASE C	2.0
CLASE D	2.0

Nota. De "IEEE recommended practice for testing insulation resistance of electric machinery (IEEE Std 43-2013)", por IEEE, 2014. (<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6754111>).

En la Figura 37 se observa el diagrama de flujo implementado para la medición de la resistencia de aislamiento.

Figura 37

Diagrama de flujo para la medida de la resistencia de aislamiento



3.1.3.6 Escena de Detección de obstrucción en membrana de ósmosis inversa

En esta escena, el usuario aprende a evaluar el estado de la membrana de ósmosis inversa mediante la interpretación de los valores de presión diferencial y el flujo de permeado. Una disminución significativa en el flujo de permeado, combinado con un aumento en la presión diferencial, indica una posible obstrucción en la membrana. Por ello, el sistema indica al usuario que interactúe tanto con el manómetro como con el rotámetro.

Para la primera fase de la escena, se implementó un sistema de interacción que permite al usuario seleccionar los manómetros ubicados en la planta. Para ello, se configuraron objetos interactivos utilizando los componentes de XR Interaction Toolkit. Al seleccionar un manómetro, se activa un panel informativo programado mediante UI de Unity, el cual muestra contenido relacionado con la importancia de monitorear la presión de entrada y salida en las membranas para determinar el diferencial de presión. Este panel se habilita a través de un script asociado al evento de selección del objeto.

De manera similar, se configuró la interacción con los rotámetros de la planta. Cada rotámetro fue definido como un objeto seleccionable y se le asignó un panel informativo que se activa mediante el mismo mecanismo de detección de selección. El propósito de este panel es mostrar información sobre la disminución de caudal en el sistema y cómo este comportamiento puede indicar obstrucción en las membranas.

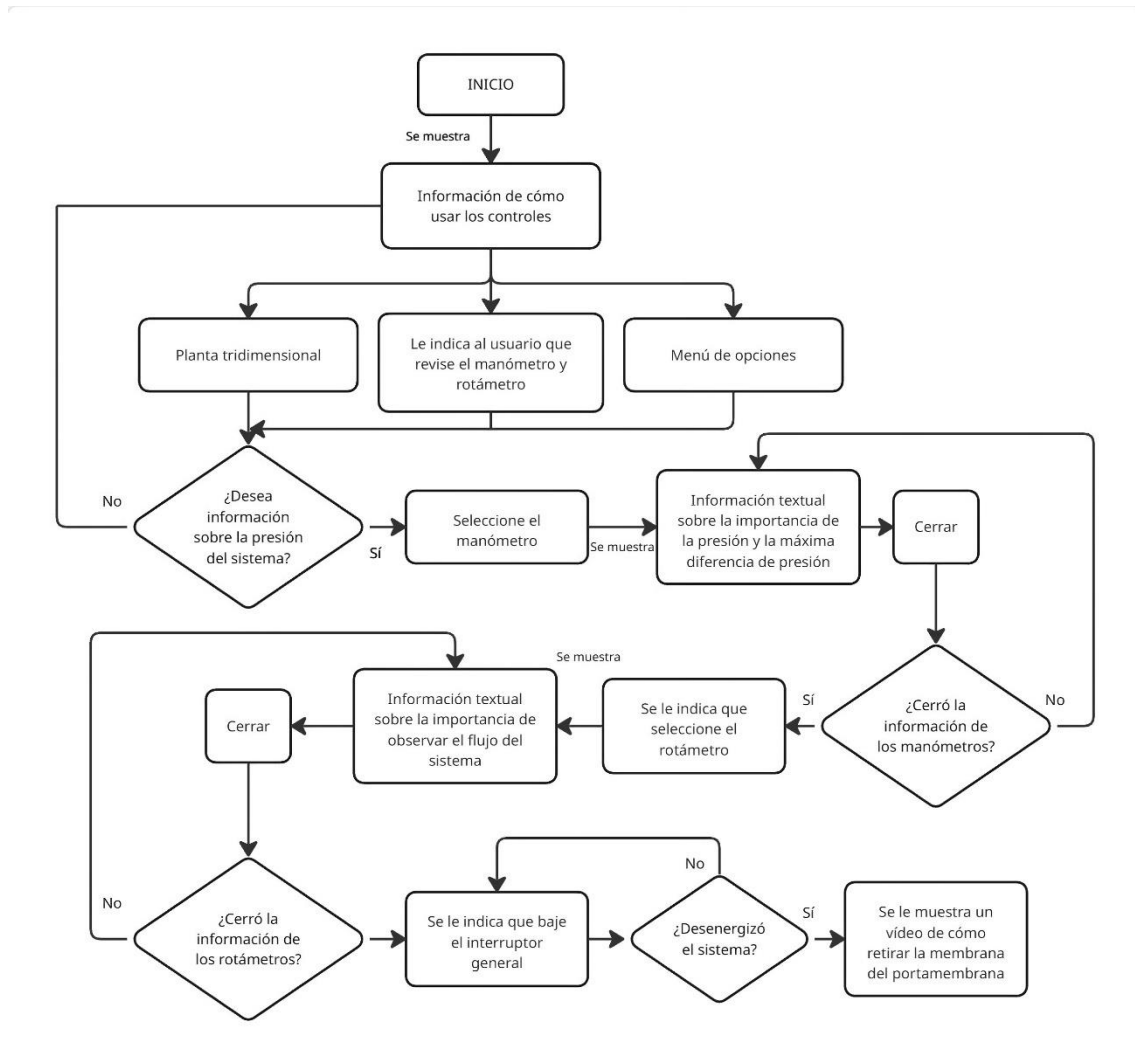
Una vez que el sistema registra que el usuario ha revisado ambos dispositivos, manómetros y rotámetros, se ejecuta una instrucción programada en un script controlador que habilita el siguiente paso del proceso: la desenergización del sistema. Para ello, se integró un evento que detecta cuando el usuario acciona el interruptor general del tablero eléctrico.

Finalmente, tras completar la desenergización, se programó la reproducción automática de un video instructivo incorporado en la interfaz. El reproductor fue implementado utilizando el componente Video Player de Unity, al cual se añadieron controles personalizables mediante UI, permitiendo al usuario adelantar, retroceder, ajustar volumen, silenciar y pausar el contenido. Estos controles se conectaron mediante scripts que gestionan las funciones del Video Player y ofrecen una experiencia de visualización interactiva y cómoda.

En la Figura 38 se observa la lógica que se siguió.

Figura 38

Diagrama de flujo del escenario “Detección de obstrucción en membranas”



3.2 Resultados Obtenidos

A continuación, se muestra los resultados obtenidos en cada escenario.

Se presentan los resultados obtenidos en la escena de “Información general de la planta”. En la Figura 39(a) se muestra la vista inicial del entorno virtual, donde el usuario puede observar las indicaciones sobre el uso de los controles, la visualización general de la planta y el equipo de protección personal (EPP) requerido. La Figura 39(b) presenta el menú del escenario principal, el cual incluye diversas opciones, entre ellas aquellas que permiten realizar el cambio de escenario. En la Figura 39(c) se presenta un ejemplo del panel informativo asociado a un dispositivo, correspondiente en este caso a la bomba de baja presión. En la Figura 39(d) se muestra el panel en el que el usuario ingresó su nombre mediante el teclado virtual; esta es la primera acción requerida para iniciar la evaluación.

La Figura 40(a) ilustra una de las diez preguntas que conforman la evaluación integrada en la escena. En la Figura 40(b) se muestra un ejemplo del resultado obtenido por el usuario, indicando el puntaje final y el tiempo empleado en completar la evaluación. Finalmente, la Figura 40(c) exhibe un ejemplo del EPP que el usuario debe utilizar en una planta física. Finalmente, en la Figura 40(d) se visualiza en una hoja de datos de Excel el reporte de los usuarios que realizaron la evaluación.

Figura 39

Primeros resultados obtenidos en la escena “Información general de la planta”

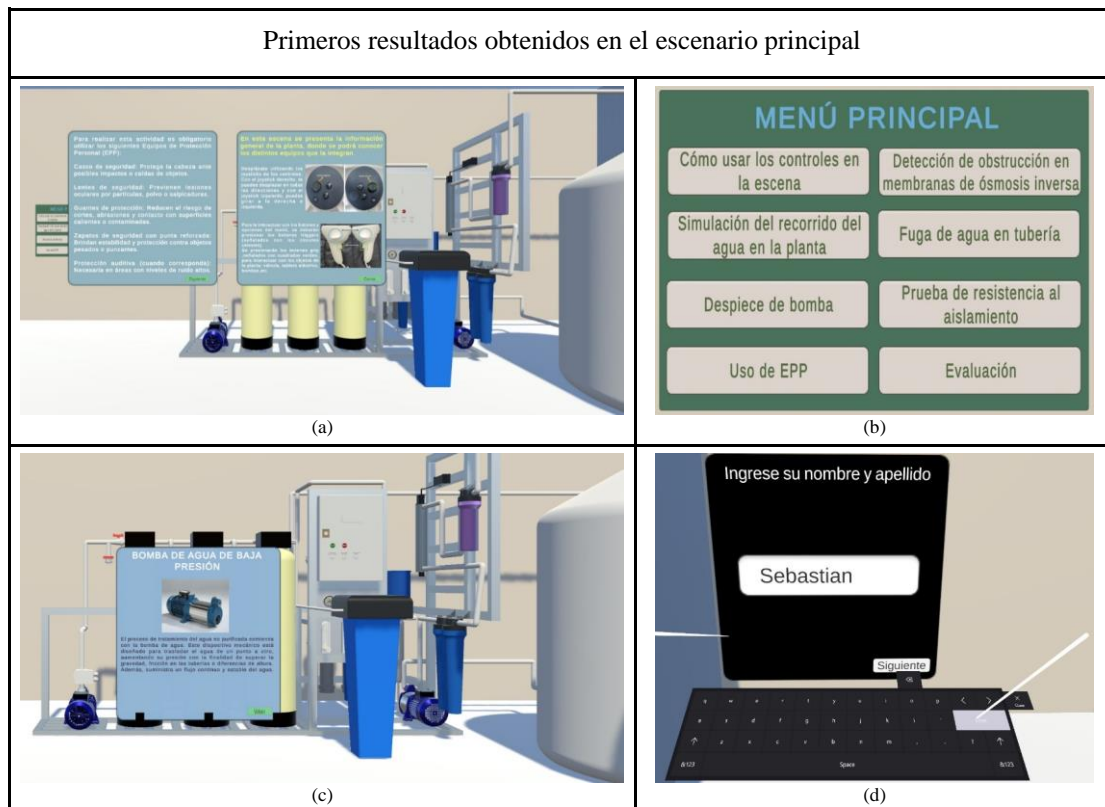
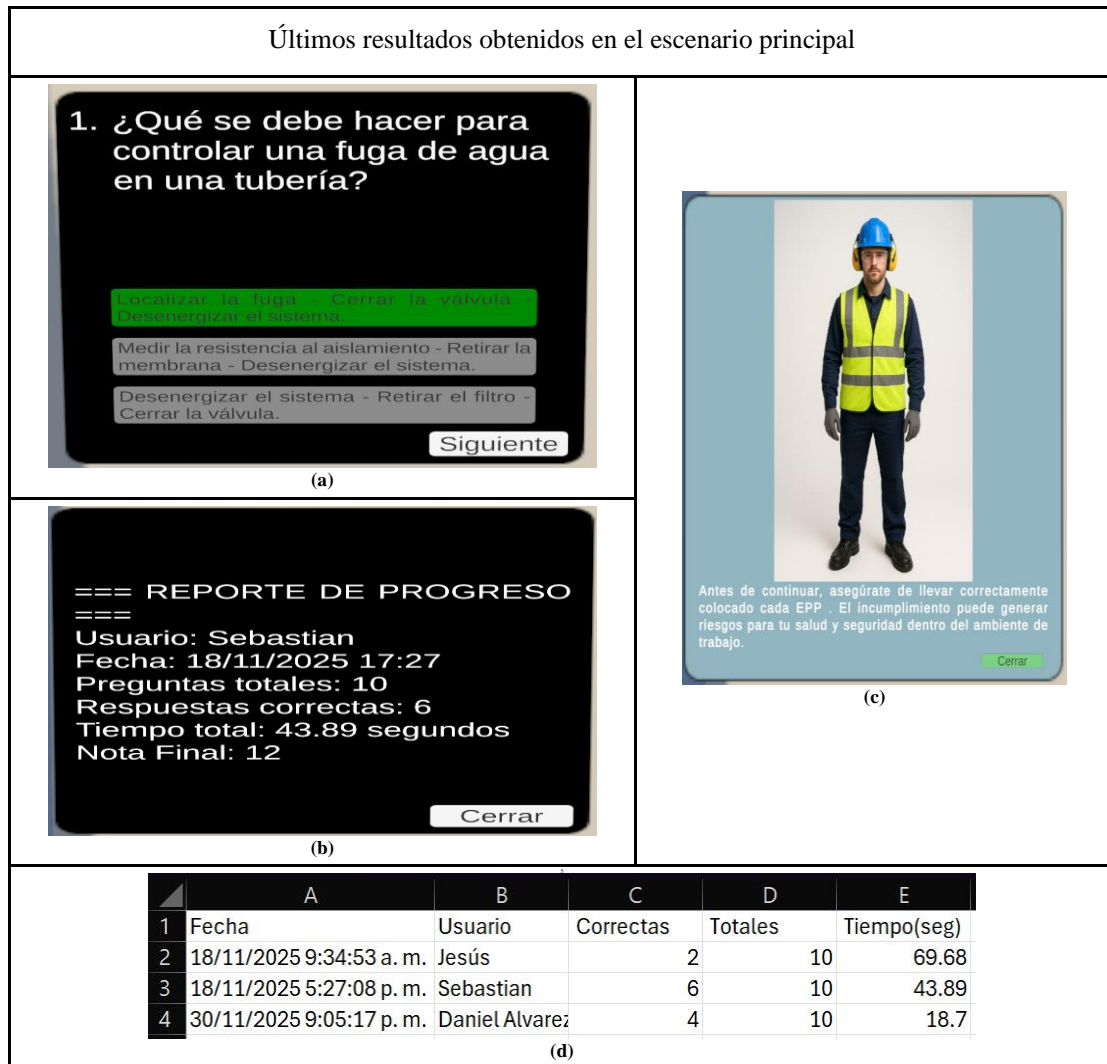


Figura 40

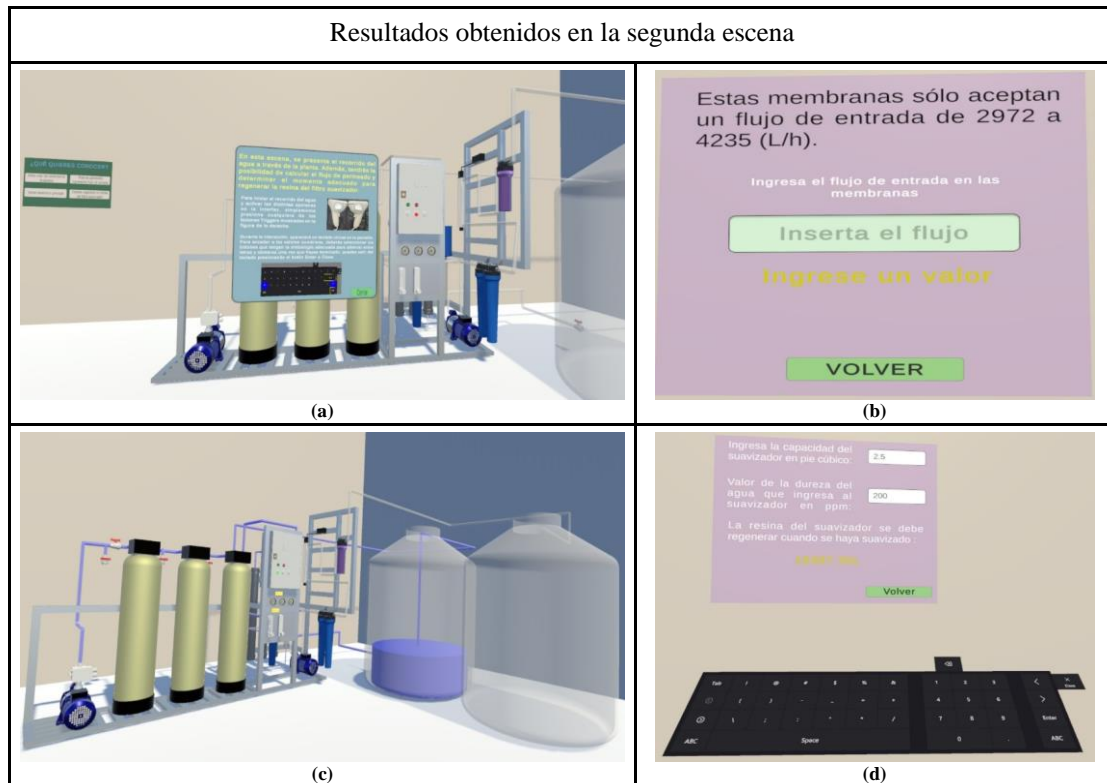
Últimos resultados obtenidos en la escena “Información general de la planta”



Se revelan los resultados obtenidos en la escena de “Simulación del recorrido del agua en la planta”. En la Figura 41(a), se observa lo que el usuario visualiza al llegar a la escena. En la Figura 41(b), se visualiza la interfaz desarrollada para calcular el flujo de permeado, donde el usuario debe ingresar un valor de flujo de entrada. En la Figura 41(c), se evidencia el recorrido del agua en la planta después de que el usuario ha presionado el botón de “Inicio”. En la Figura 41(d), se presenta la interfaz donde el usuario podrá calcular cuándo regenerar la resina del suavizador ingresando los valores de: capacidad del suavizador y la dureza del agua.

Figura 41

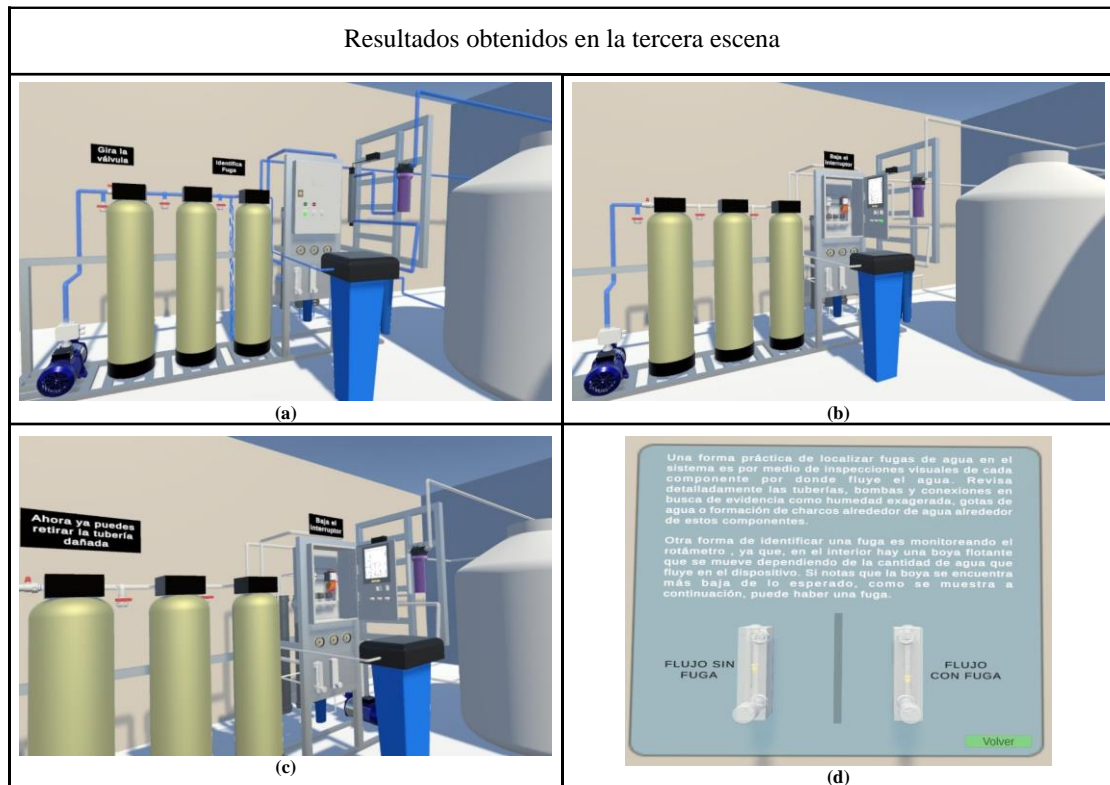
Resultados obtenidos en la escena “Simulación del recorrido del agua en la planta”



Se presentan los resultados obtenidos en la escena de Fuga de agua en tubería. En Figura 42(a), muestra la planta operando con un goteo visible en una de las tuberías. En la Figura 42(b), se observa el estado de la escena una vez que el usuario ha identificado la fuga y ha cerrado la válvula de alimentación, deteniendo así el flujo de agua. En Figura 42(c), se muestra la vista posterior a la acción de bajar el interruptor general, lo que representa la desenergización del sistema. Finalmente, la Figura 42(d) presenta un cuadro informativo que orienta al usuario sobre cómo identificar fugas y le indica la necesidad de revisar el rotámetro para detectar posibles anomalías en el caudal.

Figura 42

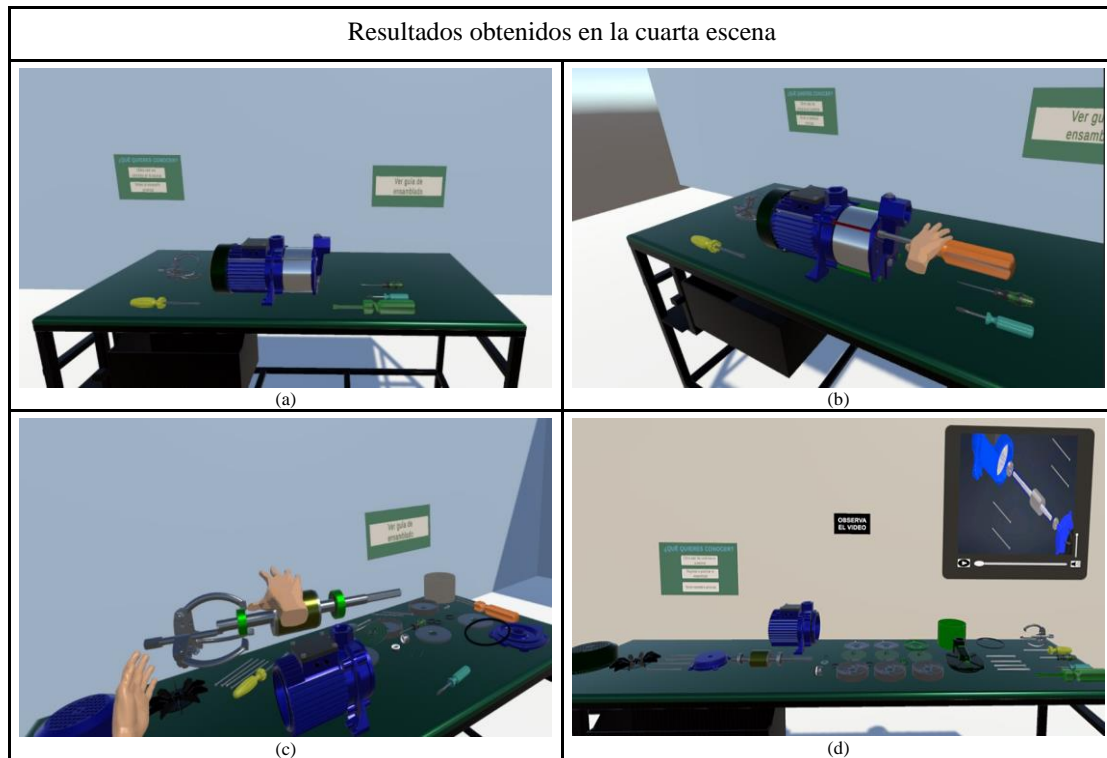
Resultados obtenidos en la escena “Fuga de agua en tubería”



Se muestran los resultados obtenidos en la escena de “Despiece de bomba”. En Figura 43(a), se muestra cómo inicia la escena. Se puede apreciar que la primera actividad que el usuario debe realizar es agarrar el desarmador, ya que se encuentra de color verde. En Figura 43(b), se observa al usuario destornillando los tornillos mediante el destornillador. En la Figura 43(c) se observa al usuario utilizando el extractor para retirar los rodamientos del eje de la bomba. Finalmente, en la Figura 43(d) se muestra la bomba completamente desmontada junto con un video que guía el procedimiento para poder realizar el ensamblaje.

Figura 43

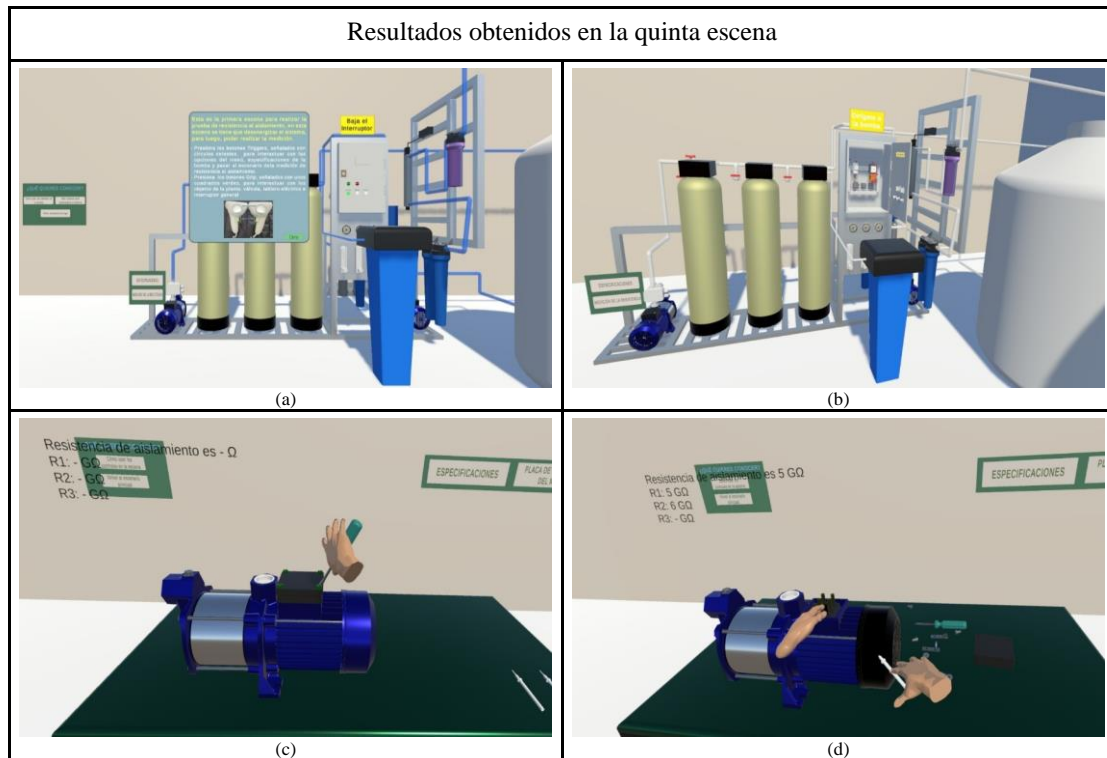
Resultados obtenidos en la escena “Despiece de bomba”



Se presentan los resultados obtenidos en la escena de “Prueba de resistencia al aislamiento”. Esta prueba está compuesta por dos escenarios: el primero se muestra en las Figura 44(a) y Figura 44(b), y el segundo en las Figura 44(c) y Figura 44(d). En la Figura 44(a), se observa el inicio de la escena. En la Figura 44(b), se observa el escenario después de que el usuario ha bajado el interruptor general, acción necesaria para poder desenergizar el sistema y retirar la bomba. En la Figura 44(c), se muestra la escena después de seleccionar la opción de “Medición de la resistencia”, junto con el destornillador para retirar los tornillos de la caja de conexiones y las pinzas para poder realizar la medición de la resistencia de aislamiento. Finalmente, en la Figura 44(d) se muestran las 3 mediciones de resistencia de aislamiento realizadas en la bomba.

Figura 44

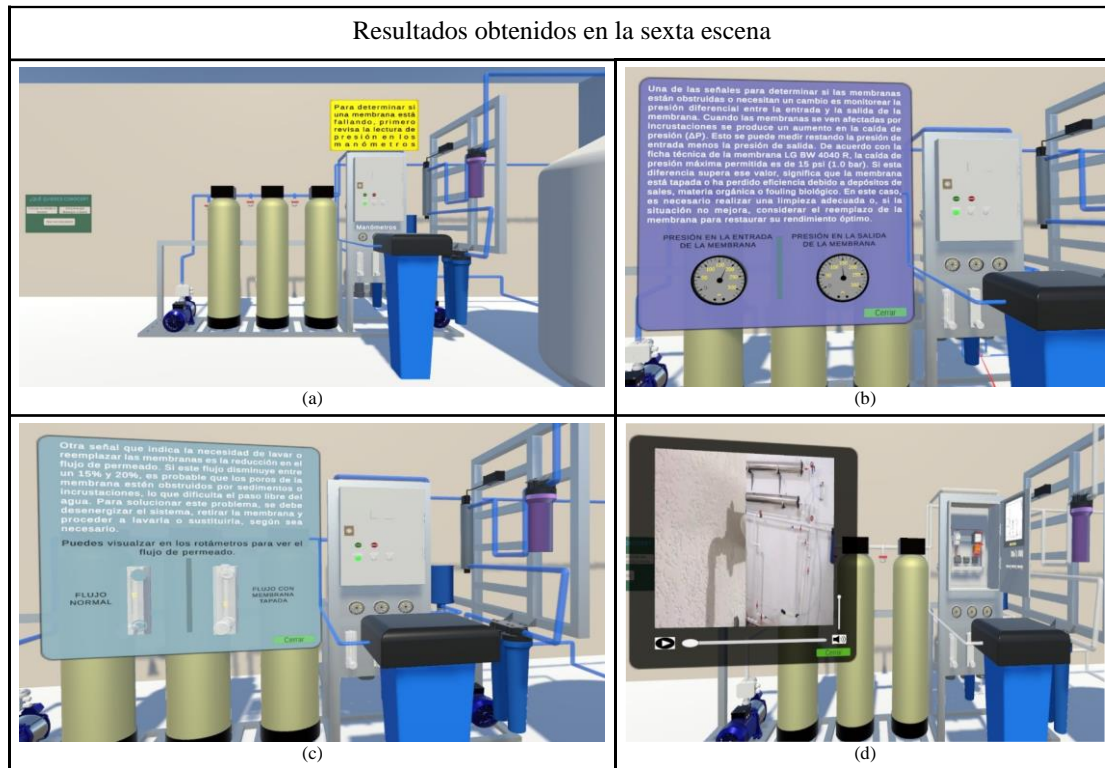
Resultados obtenidos en la escena “Prueba de resistencia al aislamiento”



Se presentan los resultados obtenidos en la escena de “Detección de obstrucción en membranas de ósmosis inversa”. En la Figura 45(a) muestra la vista inicial, donde se indica al usuario que debe observar la presión en los manómetros. En la Figura 45(b) se presenta información referente al valor máximo permitido de la presión diferencial. En la Figura 45(c) se muestra el rango máximo de disminución del flujo que permite inferir que la membrana se encuentra en buen estado. Finalmente, la Figura 45(d) exhibe el video que el usuario visualiza para comprender el procedimiento de retiro de la membrana del porta membranas, el cual se reproduce una vez completados los pasos de desenergización de la planta.

Figura 45

Resultados obtenidos en la escena “Detección de obstrucción en membranas de ósmosis inversa”



Durante las simulaciones del entorno virtual ejecutado directamente desde Unity con el Meta Quest 2 conectado a la laptop, no se detectaron errores ni lentitud en la ejecución del sistema.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Durante las pruebas realizadas, las seis escenas desarrolladas para el sistema virtual se ejecutaron correctamente, sin presentar errores ni inconvenientes de rendimiento. Esto demuestra que el entorno fue implementado de manera eficiente y opera de forma estable en todas las simulaciones previstas.
- La implementación de este proyecto facilita la comprensión, estructura y el funcionamiento de una planta de tratamiento de agua por ósmosis inversa. Gracias al modelado virtual, los paneles informativos asociados a cada dispositivo y la opción de visualizar el recorrido del agua a través del sistema, el usuario puede identificar los equipos involucrados, comprender su función y familiarizarse con la secuencia operativa del proceso. Esto permite que incluso personas sin

experiencia previa o sin acceso a una planta física adquieran una noción concreta y didáctica de su composición y operatividad.

- La implementación de una evaluación interactiva de diez preguntas permite medir el nivel de comprensión del usuario respecto a los contenidos del sistema. Esta evaluación registra datos como nombre del participante, fecha y hora, número de respuestas correctas, tiempo empleado en completar la evaluación y la calificación final. Todo esta información se almacena en una hoja de cálculo de Excel, lo que facilita el monitoreo del desempeño de los usuarios.
- El módulo de equipo de protección personal contribuye a reforzar las buenas prácticas de seguridad, ya que proporciona información clara sobre el EPP necesario y permite al usuario identificarlo de manera visual e intuitiva.
- El sistema virtual permite al usuario comprender y ejecutar de manera guiada un procedimiento para la detección y control de una fuga de agua en tuberías. A través de paneles informativos, el usuario sigue una secuencia estructurada que incluye la identificación de la fuga, el cierre de la válvula y la desenergización del sistema mediante el interruptor general.
- La simulación del procedimiento de desensamble de la bomba, empleando las herramientas específicas para cada componente, fortalece el conocimiento del usuario en la identificación de piezas en mal estado que requieren reparación o reemplazo. De esta manera, el usuario adquiere una comprensión más sólida sobre la función de cada herramienta y de las distintas partes de la bomba.
- La simulación del procedimiento de medición de la resistencia de aislamiento mediante realidad virtual permite al usuario comprender el estado del motor y familiarizarse con este proceso de forma segura. Además, fortalece su confianza dentro del entorno virtual, ya que puede practicar sin el riesgo de dañar componentes reales o afectar el funcionamiento del equipo.
- La plataforma facilita el aprendizaje sobre la identificación de una posible obstrucción en las membranas de ósmosis inversa, al instruir al usuario en la lectura de manómetros para evaluar el diferencial de presión y en la interpretación del flujo indicado por los rotámetros. Además, el sistema complementa este proceso mediante un video demostrativo que muestra el procedimiento de retiro de la membrana.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda que en futuras versiones del proyecto se incorpore una funcionalidad que permita al usuario crear sus propias preguntas con alternativas múltiples. Esto facilitaría la generación de evaluaciones personalizadas, adaptadas a las necesidades específicas de capacitación y al nivel de conocimiento de cada usuario.
- Se sugiere añadir una nueva escena dedicada al procedimiento de reemplazo y manejo de la salmuera en el tanque correspondiente. Esta incorporación fortalecería el mantenimiento, al permitir que el usuario practique una de las actividades esenciales en la operación de plantas de tratamiento de agua por ósmosis inversa.
- Se recomienda integrar un sistema SCADA completamente virtual dentro del entorno de realidad virtual, acompañado de sensores simulados que reproduzcan el comportamiento típico de una planta de tratamiento de agua. Estos sensores generarían datos ficticios pero realistas, permitiendo monitorear variables operativas como niveles, caudal, turbidez o pH de una forma controlada y pedagógica.
- Se recomienda incorporar la capacidad de conectar el entorno de realidad virtual con datos reales provenientes de sensores físicos instalados en una planta piloto o en un sistema portátil de tratamiento de agua. Esta funcionalidad permitiría que los valores mostrados dentro de la simulación provengan de mediciones reales en tiempo real, convirtiendo la experiencia en una herramienta híbrida de capacitación y monitoreo remoto.
- Se recomienda incorporar un modo colaborativo en red que permita la participación simultánea de varios usuarios dentro del mismo entorno de realidad virtual. Esta funcionalidad facilitaría actividades grupales, como prácticas supervisadas, recorridos guiados, entrenamiento de operadores y simulación de escenarios de emergencia.

REFERENCIAS

- Abdul Latif, A. A., Lau, K. K., Low, S. C., & Azeem, B. (2021). *Multicomponent spiral wound membrane separation model for CO₂ removal from natural gas*. *Membranes*, 11(9), 654. <https://doi.org/10.3390/membranes11090654>
- Adeniyi, A. O., & Jimoh, M. O. (2024). *Decontamination potential of ultraviolet type C radiation in water treatment systems: Targeting microbial inactivation*. *Water*, 16(19), 2725. <https://doi.org/10.3390/w16192725>
- Antaki, F., Doucet, C., Milad, D., Giguère, C.-É., Ozell, B., & Hammamji, K. (2024). *RetinaVR: Democratizing vitreoretinal surgery training with a portable and affordable virtual reality simulator in the metaverse* [Preprint, arXiv]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.10883>
- Antolín Gutiérrez, M. E. (2014). *Instalación de un equipo de desinfección de agua de riego contaminada por Ralstonia solanacearum por radiación ultravioleta en la balsa de Soto de Cerrato (Palencia)* [Trabajo de fin de máster, Universidad de Valladolid]. UVaDOC. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/6584>
- BOPEMA. (2021). *BOPEMA 2021*. <https://irp.cdn-website.com/f5e1a6ce/files/uploaded/BOPEMA%202021.pdf>
- Brookes, J., Warburton, M., Alghadier, M., Mon-Williams, M., Mushtaq, F., & Wilkie, R. M. (2019). *Studying human behaviour with virtual reality: The Unity Experiment Framework*. *Behavior Research Methods*, 52(2), 455–463. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01242-0>
- Carbotecnia. (s. f.). *Serie-SQ* [Manual/Informe]. <https://carbotecnia.info/PDF/uv/Serie-SQ.pdf>
- Checa, D., Bustillo, A., Saucedo-Dorantes, J. J., Osornio-Rios, R. A., & Cruz-Albarran, I. A. (2021, 13-16 de octubre). *Virtual reality-based tool applied in the teaching and training of condition-based maintenance in induction motors* [Conferencia]. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), Toronto, Canada. <https://doi.org/10.1109/IECON48115.2021.9589126>

- Checa, D., Saucedo-Dorantes, J. J., Osornio-Rios, R. A., Antonino-Daviu, J. A., & Bustillo, A. (2022). Virtual Reality Training Application for the Condition-Based Maintenance of Induction Motors. *Applied Sciences* 2022, 12(1), 1-22. <https://doi.org/10.3390/APP12010414>
- Culligan International. (2023). *How water softeners work*. <https://www.culligan.com/blog/how-water-softeners-work>
- Filipe, J., Bessa, R. J., Reis, M., Alves, R., & Póvoa, P. (2019). Data-driven predictive energy optimization in a wastewater pumping station. *Applied Energy*, 252, 113423. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113423>
- Firessa. (s. f.). *¿Qué es un suavizador de agua?* <https://firessa.com/blog/filtracion/suavizadores/que-es/>
- Hamidane, R., Mouss, L. H., Bellarbi, A., & Mahdaoui, R. (2018, 24-25 de octubre). *Implementation of a Preventive Maintenance System Based on Augmented Reality* [Conferencia]. Proceedings - PAIS 2018: International Conference on Pattern Analysis and Intelligent Systems, Tebessa, Algeria. <https://doi.org/10.1109/PAIS.2018.8598510>
- Han, Y. (2023, 13 de febrero). *Virtual Reality in Engineering Education* [Conferencia]. 2022 International Conference on Educational Science and Social Culture (ESSC 2022). <https://doi.org/10.1051/SHSCONF/202315702001>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2014). *IEEE recommended practice for testing insulation resistance of electric machinery* (IEEE Std 43-2013). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6754111>
- Khoshakhlagh, A. H., Malakoutikhah, M., Park, J., Dehghani Kodnoueieh, M., Rafieian Boroujeni, Z., Bahrami, M., & Ramezani, F. (2024). *Assessing personal protective equipment usage and its correlation with knowledge, attitudes, performance, and safety culture among workers in small and medium-sized enterprises*. *BMC Public Health*, 24, Article 1987. <https://doi.org/10.1186/s12889-024-19517-3>
- Liu, X.-W., Li, C.-Y., Dang, S., Wang, W., Qu, J., Chen, T., & Wang, Q.-L. (2022). Research on Training Effectiveness of Professional Maintenance Personnel Based on Virtual Reality and Augmented Reality Technology. *Sustainability* 2022, 14(21), 1-22. <https://doi.org/10.3390/SU142114351>

- Marco Taller. (s. f.). *Equipos de protección personal (EPP)*. <https://www.marcotaller.com/equipos-de-proteccion-personal-epp/>
- Meta Platforms. (2024). *Meta Quest 3 – Tech specifications*. <https://www.meta.com/quest/products/quest-3/tech-specs/>
- Mirauda, D., Capece, N., & Erra, U. (2020). *Sustainable water management: Virtual reality training in support of field-work*. *Sustainability*, 12(3), 757. <https://doi.org/10.3390/su12030757>
- Moreno Rosario, D. E. (2015). *Control predictivo generalizado multivariable de un bastidor de ósmosis inversa de una planta desalinizadora de agua de mar* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/items/e9b52b5f-47ad-4585-ba47-a45650b197d5>
- Ouyang, S.-G., Wang, G., Yao, J.-Y., Zhu, G.-H.-W., Liu, Z.-Y., & Feng, C. (2018). *A Unity3D-based interactive three-dimensional virtual practice platform for chemical engineering*. *Computer Applications in Engineering Education*, 26(1), 91–100. <https://doi.org/10.1002/cae.21863>
- PURIKOR. (s.f.). *Cálculo de suavizadores de agua*. <https://www.waterzone.mx/wp-content/uploads/2017/06/GUIA-DE-CALCULO-PARA-EL-SUAVIZADOR.pdf>
- Riofrio-Morales, M., & Garcia, M. V. (2021, 22-24 de mayo). *Training virtual reality-based system for detection and simulation of motors failures* [Conferencia]. The Fourth International Conference on Mechanical, Electric and Industrial Engineering (MEIE2021), Kunming, China. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1983/1/012099>
- Robayo Murillo, J. A. (2023). *Diseño de un sistema de realidad virtual escalable para simular la utilización de un torno híbrido industrial* [Trabajo académico]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83814>
- RTeng. (2023). *Understanding control panel components*. <https://www.rteng.com/blog/understanding-control-panel-components>
- Sarumathi, S., Gokul, M., Gokulavelan, M., & Roshan, R. S. S. (2023). *A review on virtual environment using Unity software*. *International Journal of Advanced*

Research in Computer and Communication Engineering, 12(11).
<https://doi.org/10.17148/IJARCCE.2023.121115>

Sholeha, S. A., Srisantyorini, T., & Andriyani. (2025). *The use of personal protective equipment (PPE) and its implications for work accidents: A review of the literature*. *Muhammadiyah Journal of Epidemiologi*, 5(2), 263–278.

Soleimanpour Makuei, M., Ketabchi, F., & Peleato, N. (2022). *Impact of water characteristics on UV disinfection of unfiltered water*. *Water Quality Research Journal*, 57(4), 247–261. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2022.006>

Sugarman, S. C. (2023). *HVAC fundamentals* (3rd ed.). River Publishers.
<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781003151975/hvac-fundamentals-third-edition-samuel-sugarman>

Tito, B. (2021, junio 30). *Sistema purificador de agua con luz ultravioleta: Filtro*. *IngenieríaAmbiental.net*. <https://ingenieriaambiental.net/purificador-de-agua-con-luz-ultravioleta/>

Wei, W., Zou, X., Ji, X., Zhou, R., Zhao, K., & Wang, Y. (2021). Analysis of concentration polarisation in full-size spiral wound reverse osmosis membranes using computational fluid dynamics. *Membranes*, 11(5), 353.
<https://doi.org/10.3390/membranes11050353>